



# Nová metodika měření hydro-zábrany na stavební kompozit

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3957 - Průmyslové inženýrství  
*Studijní obor:* 3901T073 - Produktové inženýrství  
*Autor práce:* **Bc. Michaela Linková**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Ludmila Fridrichová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Textile Engineering ■

# A new methodology for measuring hydroblocking of building composite

## Master thesis

*Study programme:* N3957 - Industrial Engineering  
*Study branch:* 3901T073 - Product Engineering

*Author:* **Bc. Michaela Linková**  
*Supervisor:* doc. Ing. Ludmila Fridrichová, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci

Fakulta textilní

Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela Linková**

Osobní číslo: **T15000049**

Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**

Studijní obor: **Produktové inženýrství**

Název tématu: **Nová metodika měření hydro-zábrany na stavební kompozit**

Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Provedte rešerši na téma šíření vlhkosti ve stavbách. Zaměřte se především na vlhkost vzniklou vlivem dlouhodobé záplavy. Popište záplavové oblasti a vyčíslíte škody na majetku.
- 2) Experimentem simulujte dlouhodobé působení vlhkosti na stavební kompozit. K experimentu použijte dvě stávající měřicí sestavy. Analyzujte metodiky měření, popište klady a zápory.
- 3) Na základě výsledků analýzy vytvořte metodický pokyn (vnitřní normu), který bude obsahovat přesný postup výroby stavebního kompozitu, podmínky realizace experimentu simulujícího dlouhodobé působení vodního sloupce.





Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] Mayerová, K. Využití nanovlákněné membrány pro ochranu dřevostaveb proti vlhkosti. Liberec, 2016. Diplomová práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci. Vedoucí práce Ludmila Fridrichová.
- [2] Krňanský, J. Difúzně otevřené fasády a zateplovací systémy (dýchající fasády). TERRA 4.1 (2005): 8.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ludmila Fridrichová, Ph.D.

Katedra hodnocení textilií

Konzultant diplomové práce: Ing. Miroslav Frydrych

Katedra hodnocení textilií

Datum zadání diplomové práce: 29. března 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 4. května 2018

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



doc. Ing. Vladimír Bajžík, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 16. dubna 2018

## Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ludmile Fridrichové, Ph.D. za odborné rady a poskytnuté konzultace. Děkuji své matce za trpělivost, vstřícnost a podporu při studiích na Technické univerzitě v Liberci.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá analýzou nového materiálu, kterým je geopolymer. Tento materiál má veliký ekologický význam při výrobě, a to že nevznikají žádné emise. Dále se zkoumá nanovláknenná membrána z hlediska její propustnosti při zátěži vodním sloupcem. Nanovláknenná membrána je zkoumána samostatně a ve spojení s geopolymerem. Geopolymer je testován s nanovláknennou membránou zabudovanou uvnitř, ale také jako samostatný materiál. Dále se zkoumá geopolymer s příměsí hliníku s určitým procentem. Maximálně se přidává 1 %, takto vysoké množství způsobuje v materiálu póry. Při experimentech se testuje geopolymer s příměsí hliníku 0,5 % a 1 %. Také byl vytvořen experiment s různými procenty hliníku v geopolymerech a byl sledován jejich růst při určitém procentu. Dále jsou v práci popsány chyby způsobené při měření, ale i při výrobě geopolymerech. Způsobené póry způsobují vyšší nasákavost než v původním geopolymerech bez příměsí hliníku. Geopolymer s membránou byl zkoumán také mikroskopicky, a to z hlediska zda geopolymer nenarušuje nanovláknennou membránu. Tato práce je především zaměřená na analýzu geopolymerech a jeho vlastností.

## **Klíčová slova**

Nanovláknenná membrána, geopolymer, hliník, vlhkost, povodeň, propustnost vody

## **Annotation**

The diploma thesis deals with analysis of new material, which is a geopolymer. This material have of great ecological importance in production, and it that doesn't produce any emissions. Further, the nanofiber membrane is examined in terms of its permeability at the water column load. The nanofiber membrane is investigated separately and in conjunction with the geopolymer. Geopolymer is tested with a nanofiber membrane inside, but also as a separate material. Further, a geopolymer with an admixture of aluminum with a certain percentage is examined. At most 1 % is added, so high amounts is makes in the material of the pores. In the experiments, a geopolymer with an admixture of aluminum of 0.5% and 1% is tested. Also was created experiment with different percentages of aluminum in the geopolymer and their growth at a certain percentage was monitored. Furthermore, errors in the measurement are described, but also in the production of geopolymer. Caused pores cause higher water absorption than in the original geopolymer without an aluminum admixture. The geopolymer with membrane was also examined microscopically, in terms of whether the geopolymer didn't interfere with the nanofiber membrane. This thesis is primarily focused on the analysis of geopolymer and his properties.

## **Key words**

Nanofiber membrane, geopolymer, aluminum, moisture, flood, water permeability



# Obsah

Seznam symbolů a zkratk	11
Úvod	12
Teoretická část	13
1. Dosavadní výzkum na katedře Hodnocení textilií (KHT)	13
2. Vlhkost vzduchu	16
2.1 Co je to vlhkost	16
2.2 Nasákavost	17
3. Povodně	19
3.1 Typy	19
3.2 Příčiny vzniku	21
3.3 Ochranná opatření	23
3.4 Povodňové mapy	24
3.5 Historie povodní na území Čech, Moravy a Slezska	28
3.6 Povodně ve světě	31
3.7 Významné události v ČR	31
3.7.1 Povodně v roce 2002	32
3.8 Finanční škody způsobené povodní	37
3.9 Vhodné domy do záplavových oblastí	39
Experimentální část	43
4. Charakteristika testovaných materiálů	45
4.1 Nanovláknenná membrána	45
4.2 Geopolymer	45
5. Metodika měření	48
5.1 Simulace dlouhodobého působení hydrostatického tlaku	48
5.1.1 Zatížení hydrostatickým tlakem	48
5.1.2 Princip zkoušky	49
6. Experimenty	51
6.1 Příprava vzorků pro experiment	51
6.1.1 Příprava geopolymery	52
6.2 Testování membrány II. generace (24 hodin)	54
6.2.1 Měření membrány z hlediska upevnění	54
6.2.2 Dlouhodobější měření membrány (4 dny)	55
6.3 Testování geopolymery	56
6.4 Další série měření	58
6.5 Experiment geopolymery s přidavkem hliníku	60

6.6	Měření geopolymery s 1 % hliníku .....	62
6.7	Měření geopolymery s 0,5 % hliníku .....	63
6.8	Nová metoda vzorků geopolymery.....	64
7.	Výsledky a diskuze .....	67
7.1	Testování nanovláknenné membrány .....	67
7.1.1	Závady vzniklé při měření: .....	68
7.2	Testování geopolymery .....	68
7.2.1	Závady vzniklé při měření: .....	70
7.3	Předmět dalšího výzkumu.....	70
8.	Metodický pokyn pro výrobu stavebního kompozitu (geopolymery).....	72
	Závěr .....	77
	Literatura .....	79
	Seznam obrázků .....	82
	Seznam tabulek .....	84

## Seznam symbolů a zkratk

$G$  [N] ..... tíha

$F_g$  [N] ..... tíhová síla

$g$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] ..... tíhové zrychlení

$V$  [ $\text{m}^3$ ] ..... objem

$S$  [ $\text{m}^2$ ] ..... plocha

$p_h$  [Pa] ..... hydrostatický tlak

$h$  [m] ..... výška vodního sloupce

$\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] ..... hustota

$t$  [d] ..... čas

$d$  [cm] ..... průměr kruhu

HT ..... z anglického High Temperature

HDPE ..... z anglického High-density polyethylene

$\Delta m$  [g] ..... změna hmotnosti (přírůstek)

$m_1$  [g] ..... hmotnost sestavy po vystavení hydrostatickému tlaku

$m_2$  [g] ..... hmotnost sestavy před vystavením hydrostatickému tlaku

## Úvod

Diplomová práce navazuje na práci Karolíny Mayerové [1], která se zabývala využitím nanovláknenné membrány pro ochranu dřevostaveb proti vlhkosti. V práci budou testovány vzorky materiálu, kterými bude samostatná nanovláknenná membrána z polyuretanových vláken a nový materiál – geopolymer. Geopolymer je materiál, který je velice zajímavý z hlediska jeho vlastností. Pro svou extrémní odolnost může sloužit jako vynikající izolace a stavební materiál. Výroba geopolymery je i ekologicky významná, při jeho výrobě nevznikají žádné emise. Bude testována přilnavost membrán z hlediska vlastností stavebního kompozitu. V experimentální části se zaměříme na nalezení optimálních materiálů, které budou propojeny s omítkou. Cílem práce je navrhnout metodiku (vnitřní normu) pro simulaci dlouhodobého působení vodního sloupce na stavební kompozit, kterým je geopolymer. Bude navržen stavební kompozit s hydroizolačními vlastnostmi, který obsahuje nanovláknennou membránu. Tento nový materiál bude proměřen na malých vzorcích na stávající sestavě. Poté bude snahou vzorky zvětšit a navrhnout nový měřicí systém pro větší vzorky.

Rešeršní část bude zaměřena na předchozí práci Karolíny Mayerové, která zjistila, že nanovláknenná membrána aplikovaná mezi fasádní vrstvy pomáhá k výraznému snížení propustnosti vlhkosti fasádou. Bude popsáno téma šíření vlhkosti ve stavbách. Především vlhkost vzniklá vlivem dlouhodobé záplavy (povodně).

Experimentální část bude zaměřena na simulaci dlouhodobého působení vlhkosti na stavební kompozit. K experimentu budou použity dvě stávající měřicí sestavy. Zaměříme se na analýzu metodiky měření z hlediska kladů a záporů při realizaci vzorků. Dále budou popsány vlastnosti testovaných materiálů s využitím pro ochranu staveb.

## **Teoretická část**

### **1. Dosavadní výzkum na katedře Hodnocení textilií (KHT)**

Prostřednictvím diplomové práce, kterou řešila Karolína Mayerová, bylo popsáno téma „Využití nanovláknenné membrány pro ochranu dřevostaveb proti vlhkosti“. Práce se zabývá využitím membrány z nanovláknenného materiálu ve stavebnictví za účelem ochrany dřevostaveb proti pronikání vlhkosti. V rešeršní části je rozebrána problematika dřevostaveb, kterou tvoří rámová konstrukce, kde může hrozit biologická degradace dřeva v důsledku nadměrného hromadění vlhkosti. Byly popsány především tzv. sendvičové konstrukce, na jejichž fasádu se používá kontaktní zateplovací systém s omítkou jako u zděných staveb. Cílem práce bylo navrhnout ochranu povrchu dřevostaveb proti pronikání vlhkosti do konstrukce. Mayerová se zaměřila na ochranu pomocí membrány z nanovláknenného materiálu, u kterého předpokládala velmi dobrou paropropustnost. Kromě toho testovala další dva materiály, které se běžně používají ve stavebnictví jako bariéra proti vlhkosti. Po navržení aplikace nanovláknenné membrány na vnější stěny dřevostavby Mayerová zjišťovala, zda došlo ke zlepšení bariérových vlastností fasády proti pronikání vody. Experimentálně prověřila chování textilního materiálu (nanovláknenné membrány) v kombinaci s materiálem stavebním.

Sledovala se propustnost vody u samostatné membrány, i u membrány aplikované na stavební podklad. Samostatná membrána byla nejprve otestována zkouškou tlakem vody, která se běžně používá u textilních materiálů. Bohužel se tato metoda ukázala jako nevhodná a proto byl navržen experiment, který simuloval dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu. V práci byla navržena metodika přípravy zkušebních vzorků membrány se stavebním materiálem. Testované vzorky membrán byly vystaveny dlouhodobému účinku působení vody. Statistické zhodnocení prokázalo významné zlepšení bariérových vlastností stavebního materiálu při použití membrány. Zjištěna byla logaritmická závislost propustnosti vody na čase. Současně byla sledována paropropustnost a prodyšnost membrány, aby při aplikaci nedošlo ke zhoršení difúze vodních par a proudění suchého vzduchu stěnou. Na paropropustnost a prodyšnost byly otestovány další dva materiály, které se ve stavebnictví využívají jako bariéra proti vlhkosti. Při porovnání všech materiálů nanovláknenná membrána vykazovala statisticky významně nejvyšší hodnoty z hlediska paropropustnosti i prodyšnosti.

V průběhu práce si Mayerová stanovila další cíl, a to navržení vhodné metodiky měření průniku vlhkosti. Sledovala dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu jako například při povodních. Z tohoto důvodu navrhla experiment, který simuloval dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu.

Položila si otázkou, zda navržené propojení se stavebním podkladem narušuje hydroizolační schopnosti testované membrány či nikoliv. Byla sledována hypotéza, zda lze tento materiál jako bariéru proti vlhkosti použít.

Mayerová v práci zjistila, že existuje aplikace nanočástic sloužících k ochraně povrchů stavebních konstrukcí. Takové látky na principu nanotechnologie mohou obsahovat například nanočástice oxidu křemíku, stříbra, titanu či jiných prvků s biocidním účinkem zneškodňující celou řadu mikroorganismů. Na dřevěném materiálu současně vznikne z nanočástic hydrofobní povrch, na kterém jsou takové nanočástice (molekuly), které nenesou žádný náboj. Ošetření vzorku nanočásticemi oxidu titaničitého způsobilo, že po uplynutí 50 dnů nevzniklo žádné napadení houbovými zárodky (plísně), kdežto u neošetřeného materiálu byl stupeň kolonizace až 80 %. Povrchové úpravy na bázi nanovláken mohou poskytnout dostatečnou dlouhotrvající ochranu dřevěných konstrukcí díky nanočásticím s biocidními účinky a zároveň mají nízký difúzní odpor.

Principem experimentu bylo určit, jaké množství kapaliny pronikne vrstvou vzorku o známé ploše za určitý čas při působení daného hydrostatického tlaku. Sledovaným parametrem byla hmotnost vody, která pronikne vzorkem do testovací sklenice. Pro aplikaci testovaného materiálu využila HT trubku, která neumožnila dokonalé utěsnění. Na místo této metody zvolila upevnění materiálu na skleněnou nádobu. Do trubky nalila vodu odpovídající sledovanému vodnímu sloupci. Sledovanou hodnotou byl váhový přírůstek aranžérské hmoty vzniklý proniknutím vody skrz vzorek. V průběhu nastaly komplikace, kde nebylo možné kontrolovat testovací nádobu v průběhu měření a dále složitost obsluhy zařízení vyžadující kompletní demontáž po každém měření. Mayerová provedla modifikaci, kde osadila trubku na jednom jejím konci zátkou, kterou již nebylo potřeba demontovat, a vytvářela dno. Skleněnou nádobu opatřila měděným nebo železným závažím, pomocí mechanismu byla spouštěna na dno vodou naplněné trubky.

Provedenými experimenty Mayerová zjistila, že díky aplikaci nanovláknenné membrány mezi jednotlivé fasádní vrstvy dochází k výraznému snížení vodní propustnosti fasády. Došla k závěru, že membrána splňuje funkci, jako bariéra proti vlhkosti a lze ji použít ve stavebnictví za tímto účelem.

Dále v práci navrhuje, jak by se dalo pokračovat v dalším výzkumu. Navrhla využít gravimetrickou metodu, která umožňuje testovat téměř jakýkoliv materiál z hlediska paropropustnosti. Také uvažuje o simulaci reálných podmínek na zmenšeném modelu stavby.



Tento model by simuloval reálné chování stavby. Simulováno by bylo vlhké podloží stavby, chování budovy zatopené povodní aj.

Zejména je potřeba řešit vlhkost ve větších plochách, respektive vlhkost domu či bytu.

## **2. Vlhkost vzduchu**

Mohli bychom si položit otázku, proč vlastně vlhkost vzniká a co je příčinou? Vlhkost je běžný fyzikální jev, vzniká vždy tam, kde je přítomna voda. Základem je voda a teplota (většinou vyšší). Můžeme to sledovat běžně v přírodě, kdy ráno spadne rosa a východ slunce zapříčiní vypařování, čili tvorbu vlhkosti. Dále je to vlhkost v lese, kdy po dešti je voda usazená v korunách stromů a v půdě, a když slunce les zahřeje, dochází k tvorbě vlhkosti, kde se velice daří i houbám. Jiným příkladem je vlhkost v domě či bytě, která bude v práci dále řešena.

### **2.1 Co je to vlhkost**

Vlhkost je základní vlastnost vzduchu, je to množství vody v plynném stavu, tj. vodní páry. Nachází se všude kolem nás. Množství vodní páry je rozdílné v různém prostředí a časově velice proměnlivé. Z pohledu meteorologie a klimatologie má množství vodních par zásadní význam, závisí na něm počasí a místní podnebí. Vlhkost vzduchu by neměla přesáhnout 60 %. Ideální stav je okolo 40 %. Pokud je vlhkost vyšší než 70 %, objevuje se plíseň na stěnách, pod koberci, na nábytku, ale i na textiliích a obuvi. [2]

#### **Jak se tvoří**

Vlhkost se tvoří několika způsoby. Je to vlivem změn klimatického prostředí, ale také vlivem činnosti člověka. Každý z nás se určitě při nějaké činnosti setkal s vlhkostí. Nejčastěji se s vlhkostí potýká každá žena při běžných pracích v domácnosti. Vaření, praní, sušení, ale i žehlení prádla. Když v místnostech přitom neproudí vzduch, vodní pára se sráží na stěnách a zařízení a vsakuje se. Můžeme si pomoci, když při těchto činnostech otevřeme okno. Nebo si při sprchování pustíme větrák, při vaření digestoř. [3]

#### **Příčiny vzniku**

Nejčastější příčinou je špatná izolace, respektive zateplení bytu či domu. Většinou na závadu na izolaci narazíme po relativně dlouhé době, kdy se projevuje jen nenápadně. Přijdete na ni až ve chvíli, kdy ucítíte v místnosti zatuchlý vzduch a objeví se černá plíseň většinou v koutech místnosti nebo okolí oken. Pokud je pronikání vody a vlhkosti do konstrukce stavby masivnější, ať už z důvodu velmi poškozené izolace nebo úplně chybějící izolace, stává se velmi často, že se na stěnách tvoří solné výkvěty. Sůl je obsažena právě v půdě, ze které se vlhkost dostává do zdi, kde se vysráží v maličké krystalky usazené právě na okrajích mokrých map. Další příčinou je poškození střechy, kdy vznikne ve střeše díra, kterou většinou objevíme až ve chvíli, kdy se na stropě nebo zdi ukáže voda. Také lidský faktor může dát impuls k jejímu vzniku, ale i zvířata žijící v domě či bytě. [4]

## **Může škodit lidskému zdraví?**

Vlhkost a následně vytvořené plísně, které se usazují v místnosti, mohou negativně ovlivňovat lidské zdraví a vyvolávat různé nemoci a alergie. Zejména děti a starší lidé patří mezi nejohroženější skupiny. Jejich organismus se nedokáže tak účinně bránit. Proto je nutné plísně co nejdříve zlikvidovat.

## **Jaká je v domě**

Velké komplikace přináší voda vztlínající směrem od základů domu nahoru, která postupně proniká zdí. Vztlínající vlhkost, která se nejčastěji objevuje u starších domů, je způsobena nedostatečnou, chybějící nebo již opotřebovanou hydroizolací. Spolu s vlhkostí dochází ke vztlínání solí, které působí stejně zhoubně jako vlhkost, protože se usazují ve zdivu a postupně jej napadají a ničí. Při zabydlování novostaveb je důležité co nejvíce topit a větrat. Odstraní se tím vlhkost zabudovaná při výstavbě. [5]

Vlhkost může kompletně zničit nábytek, celou konstrukci zdiva včetně fasády i vnitřních nátěrů a omítek. V neposlední řadě způsobuje vlhké zdivo nezanedbatelné tepelné a energetické ztráty. Přílišná vlhkost znehodnocuje vrstvu izolace a snižuje tím i její izolační vlastnosti.

## **Jak se proti ní bránit**

Všude uslyšíte, že nejdůležitější prevencí proti vlhkosti v domě či bytě je pravidelné větrání, a to vždy po nějaké činnosti, ať už je to sprchování nebo vaření. Vždy je potřeba větrat několikrát denně v pravidelných intervalech kolem 5-10 minut.

Dále je nejlepší prevencí kvalitní izolace obytného prostoru, především v oblasti oken a dveří.

Kvalitní střecha, je základ suchého domu a prevence proti dalším výdajům. Kontrola střechy je vhodná na jaře a před zimou, než napadne první sníh a po každé vichřici. Tato prevence, se Vám v každém případě vyplatí. Předejdete tak nečekaným a v některých případech i značným rodinným výdajům. [4]

Na trhu jsou také dostupné různé přípravky, které bojují s plísní. Vhodným doporučením jsou speciálně upravené barvy a laky, které chrání zdivo před těmito vlivy. Vhodné je také použití různých elektrických odvlhčovačů vzduchu, pohlcovače vlhkosti a zápachů nebo klimatizace.

## **2.2 Nasákavost**

Jedná se o maximální množství vlhkosti, které může být v materiálu obsaženo. Její hodnota se udává jako hmotnostní nebo objemová. Definuje se po jisté době ponoření materiálu (vzorku)

do vody v závislosti na čase (1 hodina, 1 den apod.) nebo při své maximální hodnotě, kdy jsou již všechny otevřené póry materiálu (vzorku) vyplněny vodou. [6]

<b>Materiál</b>	<b>Hmotnostní nasákavost %</b>	<b>Objemová nasákavost %</b>
<b>Dřevo</b>	<b>140 - 170</b>	<b>55 - 70</b>
<b>Ocel</b>	<b>- 0</b>	<b>- 0</b>
<b>Cihly plné, pálené</b>	<b>20 - 25</b>	<b>36 - 55</b>
<b>Beton hutný</b>	<b>6 - 13</b>	<b>13 - 30</b>
<b>Pórobeton</b>	<b>40 - 90</b>	<b>35 - 40</b>
<b>Pěnový polystyren</b>	<b>70 - 500</b>	<b>&lt; 7</b>

Obrázek 1: Nasákavost vybraných stavebních materiálů [6]

### 3. Povodně

Povodňové situace představují na území České republiky největší hrozby přírodních katastrof. Tato skutečnost je dána polohou České republiky v kontinentálním i celosvětovém měřítku. Vzniku povodní nelze zabránit, lze pouze zmírnit jejich dopad na životy a majetek obyvatel. Povodně na našem území způsobily za posledních 17 let škody za cca 190 mld. Kč a významně vstoupily do života společnosti. [7]

Režim povodní v České republice je ovlivněn polohou území státu v oblasti mírného klimatického pásma.

Povodeň – zpravidla výrazné přechodné zvýšení hladiny vodního toku způsobené náhlým zvětšením průtoku (nejčastěji v důsledku dešťových srážek nebo tání sněhu) nebo zmenšením průtočnosti koryta (ledovou zácpou, ucpáním mostních otvorů apod.).

Záplava – občas se používá jako synonymum povodně, ale ve skutečnosti jde o důsledek, tj. o vyhlazení vody z koryta v důsledku povodně. [8]

#### 3.1 Typy

Povodně rozdělujeme do několika typů. Jedná se výhradně o přírodní jev, který může způsobit katastrofální následky. Škody mohou být značné, jak na majetku lidí či státu, ale nejvíce postihuje lidi samotné, kteří mohou podlehnout šoku z následku povodně a podlehnout psychickým depresím. V těchto situacích pomáhá lidská solidarita, tedy vzájemná pomoc mezi lidmi samotnými, ale také pomoc státu – finanční podpora v nouzi a možné zázemí, přijde-li rodina o bydlení.

Povodně z tání – velké povodně způsobené táním sněhu vznikají v zimním a jarním období. Nebezpečnými faktory jejich vzniku jsou velké množství sněhu, zejména v nižších a středních nadmořských výškách, zima bez výskytu dílčích tání, promrzlá půda pod sněhovou pokrývkou, rychlé oteplení s teplotou vzduchu nad bodem mrazu i v noci, a především dešťové srážky v průběhu oblevy. Velké historické povodně tohoto typu se u nás vyskytly např. v letech 1784, 1845, 1940 nebo v roce 2006.

Ledové povodně – zámrz řeky zmenšuje průtočný profil, navíc při oblevě jsou ledové kry unášeny a mohou tvořit ledové bariéry, za nimiž se voda vzdouvá a zaplavuje údolí. Riziková místa pro vznik ledových bariér na tocích jsou zejména v místech mělčin, jezů apod. V našich

podmínkách se jedná spíše o lokální zaplavení, ale například na sibiřských řekách mohou být zaplaveny stovky km<sup>2</sup>.

Letní povodně – několikadenní intenzivní letní srážky, často zesilované na návětrí hor, nasatí půdu, která již dále není schopna zadržovat vodu, a vznikají povodně. Tento typ povodní postihuje nejen malé řeky a potoky, ale i velké řeky, které zaplavují rozsáhlé oblasti říčních niv až po několik dní. Velké letní povodně známe z historie nedávné, z let 1997, 2002 a 2010, i dávne, například povodeň 1897 na Labi, 1903 na Odře a na Vltavě v letech 1890, ale i 1432 a 1118.

Letní přívalové povodně – přívalové povodně vznikají následkem krátkodobých a velmi intenzivních přívalových srážek při letních bouřkách. Rychlý přísun srážek nestačí půda vsakovat a voda odtéká rychle po povrchu. I když zasažená plocha většinou není velká, voda proudí velmi rychle, má velkou ničivou sílu a způsobuje značné škody. Velké přívalové povodně postihly například v roce 1872 povodí dolní Berounky, v roce 1998 Rychnovsko a v roce 2009 například Jičínku.

Zvláštní povodně – zvláštní povodně vznikají havárií vodních děl – protržením hrází rybníků či přehrad. Jsou velmi rychlé, naštěstí však výjimečné. Největší zvláštní povodeň u nás nastala 18. 9. 1916 protržením přehrady Bílá Desná v Jizerských horách.

### **Další zvláštní typy povodní**

Pluviální povodně – pluviální povodně vznikají zaplavením plochých území dešťovou vodou, která neodtéká vodními toky. U nás nejde o významný jev, ale v rovinných oblastech působí značné škody.

Bahnotoky, mury – někdy se srážkami nasatí půda natolik, že ztratí stabilitu a po svahu dolů proudí hustá směs vody, bahna a kamení, která na své cestě vše ničí.

Jökulhaup – jedná se o zvláštní druh povodně vyskytující se na Islandu. Při výbuchu sopky láva naráz rozpustí ledovec a sníh na vrcholu sopky a vzniklá voda se řítí do údolí.

Povodně na mořském pobřeží – na mořském pobřeží škody často působí tzv. bouřlivý příliv, kombinace přílivu a větrných bouří. Nebezpečné jsou i povodně spojené s tropickými bouřemi, tajfuny a hurikány (Katrina v roce 2005 téměř zcela zničila město New Orleans).

Povodně z podzemních vod – v některých geologicky příhodných místech může docházet ke vzestupu hladiny podzemní vody až nad povrch. U nás nejde o významný jev.



Tsunami – Tsunami vzniká v mořích a oceánech při zemětřeseních či sopečných výbuších, kdy se pohybuje všechna voda od hladiny až ke dnu ohromnou rychlostí až stovek km za hodinu. U pobřeží se vlny zvyšují a mohou dosáhnout výšky až desítek metrů. Tsunami však může vzniknout i na jezerech a nádržích, a sice pokud se do nich sesune velký kus svahu.

Ve světě bychom mohli nalézt i řadu další specifických typů povodní, např. ve městech hrozí povodně z kanalizace, v Himalájích je velkým problémem nebezpečí protržení ledovcových jezer, atd.

[9]

### 3.2 Příčiny vzniku

Kromě srážek se na vzniku povodně podílí i řada dalších faktorů. Některé z nich jsou dány tvarem a morfologií povodí, jiné půdními a rostlinnými pokryvy, hydrogeologickou strukturou, způsobem hospodaření apod.

Za klíčové z hlediska vzniku povodní lze tedy považovat:

- četnost srážek, jejich výšku (v mm), intenzitu, trvání a jejich rozdělení v ploše,
- stupeň nasycení půd,
- kapacitu koryt vodních toků a jejich okolí,
- aktuální fyzický stav povodí.

Velikost povodní a povodňových škod závisí na průběhu povodní, charakterizovaný hodnotou kulminačního průtoku, tvarem a objemem povodňové vlny a také dobou trvání povodní. Dále je velikost povodní ovlivněna kapacitou, stavem a odolností koryt vodních toků, způsobem zástavby a využívání záplavového území. Důležitým faktorem je také připravenost a úroveň prováděných opatření na ochranu před povodněmi a včasná informovanost o povodňovém nebezpečí.

Tvar povodňové vlny ovlivňuje plocha povodí, jeho výšková členitost a povrch, tvar říční sítě, geomorfologické charakteristiky říčního koryta a velikost i intenzita srážek, které na povodí spadly. Objem vlny i velikost kulminačního průtoku jsou ovlivňovány především velikostí, intenzitou, dobou trvání a místním rozložením srážek, velikostí plochy zasažené deštěm i nasycení půdy.

Četnost výskytu povodní se statisticky vyhodnocuje jako n-leté vody. Kupříkladu kulminační průtok 10leté povodně je hodnota, které je v průměru dosaženo jednou za 10 let. Přitom se však

např. na Labi v Děčíně nevyskytla voda větší než pětiletá po dobu více než 40 let od r. 1941, naopak, v roce 1941 bylo celkem 9 povodní. [8]

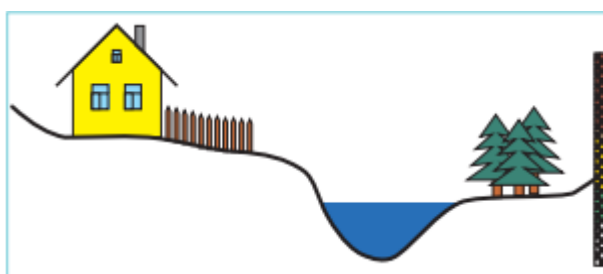
<b>(1) Při nebezpečí povodně nastává stav bdělosti; zaniká, pominou-li příčiny takového nebezpečí (první stupeň).</b>
<b>(2) V době vlastní povodně se vyhláší stav pohotovosti na základě údajů hlídkové služby, popřípadě zpráv předpovědní a hlásné povodňové služby nebo na návrh správců vodních toků (druhý stupeň).</b>
<b>(3) Při bezprostředním nebezpečí větších škod nebo při vzniku takových škod se vyhláší stav ohrožení (třetí stupeň).</b>
<b>(4) Stav pohotovosti a stav ohrožení vyhláší a odvolává</b>
<b>a) pro území obce (města) - obecní (městský) úřad</b>
<b>b) pro území několika obcí téhož okresu a pro území okresu - okresní úřad</b>
<b>c) pro území několika okresů téhož kraje, pro území kraje a na hraničních tocích - krajský úřad</b>

Obrázek 2: Stupně povodňové aktivity [8]

### Stupně povodňové aktivity

#### 1. Stupeň povodňové aktivity – bdělost

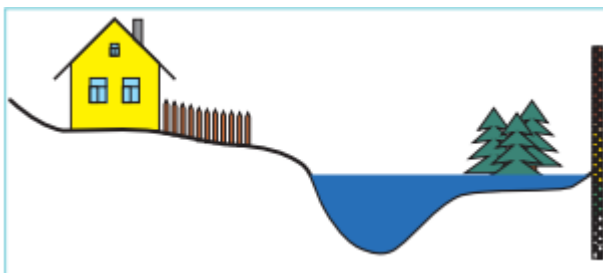
Tento stupeň povodňové aktivity je charakterizován tím, že je voda v korytě, průtok je nadprůměrný a probíhá příprava na povodeň.



Obrázek 3: 1. Stupeň povodňové aktivity – bdělost [10]

#### 2. Stupeň povodňové aktivity – pohotovost

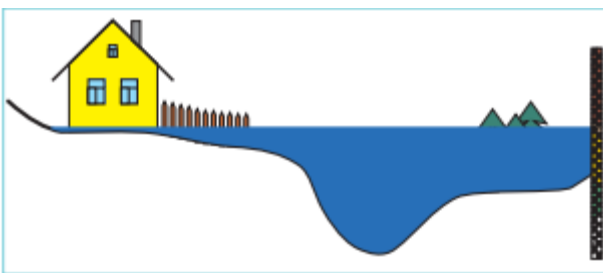
U tohoto druhu voda již vystupuje z koryta, začíná zaplavovat přilehlá území, tato úroveň je navržena tak, že voda ještě nepůsobí žádné škody.



Obrázek 4: 2. Stupeň povodňové aktivity – pohotovost [10]

### 3. Stupeň povodňové aktivity – ohrožení

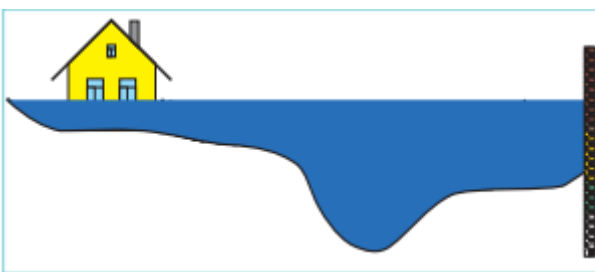
V této situaci voda zaplavuje území, kde vznikají škody, provádí se zabezpečovací, v případě potřeby také záchranné práce a evakuace.



Obrázek 5: 3. Stupeň povodňové aktivity – ohrožení [10]

### 3. Stupeň povodňové aktivity – extrémní povodeň

Tento stupeň byl zaveden pro případ výskytu extrémně nebezpečné situace. Průtok překročil 50letý průtok, situace je extrémně nebezpečná.



Obrázek 6: 3. Stupeň povodňové aktivity – extrémní povodeň [10]

[10]

## 3.3 Ochranná opatření

Technická opatření – příkladem technických opatření jsou retenční nádrže, zkapacitňování koryt, jejich stabilizace (opevňování), výstavba ochranných hrází, inženýrské a inženýrsko-biologická opatření ke snížení eroze a zvýšení retence v povodí.

Netechnická opatření – do netechnických (nestavebních) opatření patří zejména definování záplavových zón a jejich právní zajištění, předpovědní a varovné systémy, výchova veřejnosti k odpovědnému chování při povodňových rizikových situacích. Na tocích, pro které je doba reakce povodí kratší než 3 hodiny, jsou z pohledu ochrany zdraví a životů obyvatel důležitější technická opatření. [8]

### 3.4 Povodňové mapy

Objektivní postupy posuzování míry povodňového nebezpečí, vyjádření povodňového rizika a stanovení výše možných škod patří k velmi aktuálním problémům s celospolečenským významem. Směrnice Evropského parlamentu a Rady o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik (dále Směrnice 2007/60/ES) ukládá členským státům povinnost postupně na jejich území vyhodnotit povodňové nebezpečí, riziko a pořízené informace zpracovat do formy příslušného mapového vyjádření. [12]

#### Jednorozměrné modely (1D)

Modelovaná oblast je schematizována soustavou příčných profilů, přičemž se předpokládá, že proudění se děje ve směru spojnic mezi jednotlivými profily a lze ho zjednodušeně popsat v každém profilu pomocí polohy hladiny a střední průřezové rychlosti ve směru osy koryta.

Oblast vhodnosti aplikace jednorozměrných modelů je v důsledku použité schematizace omezená. Modely lze bez problémů aplikovat v oblastech, kdy proudění má převážně jednorozměrný charakter (paralelní proudění v toku a inundačním území, konstantní úroveň hladiny v příčném směru), např. pokud je předmětem řešení proudění v korytě řeky s přilehlým inundačním územím menšího rozsahu a pravidelného tvaru.

Výhoda jednorozměrných modelů spočívá v jejich jednoduchosti a v relativně malých nárocích na vstupní data. [11]



Obrázek 7: Ukázka povodňové mapy v 1D modelu [11]

#### Dvourozměrné modely (2D)

Pracují s prostorovou reprezentací koryta a záplavového území v podobě spojitého digitálního modelu terénu a umožňují detailně vystihnout variabilní charakter proudění při povodňových situacích ve složitých prostorových podmínkách.

Jsou tedy vhodné pro modelování širokých inundačních území s nepravidelnými terénními prvky – koryta, náhony, hráze, násypy komunikací, pro modelování urbanizovaných území a ve všech ostatních případech, kdy nejsou jednoznačně splněny podmínky vhodnosti aplikace jednorozměrných či kvazidvourozměrných modelů.

2D modely mají vyšší nároky na vstupní data a přípravu modelů i na zpracování vlastních simulací.

Poskytují podrobnější výstupy interpretovatelné přímo ve formě map povodňového nebezpečí. [11]



Obrázek 8: Ukázka povodňové mapy ve 2D modelu [11]

### **Metoda matice rizika**

K vyhotovení map povodňového nebezpečí byla v ČR doporučena metoda matice rizika. Metoda matice rizika je jedním z nejjednodušších postupů pro hodnocení potenciálního ohrožení a rizika v záplavových územích. Metoda nevyžaduje kvantitativní odhad škody způsobené vyběžením vody z koryta toku, ale povodňové riziko vyjadřuje pomocí čtyřstupňové škály.

Vstupními daty jsou výsledky hydraulického modelování (1D, 2D) – mapy hloubek vody a mapy rychlostí vody pro požadované scénáře nebezpečí (pro jevy s dobou opakování 5, 20, 100 a 500 let).

Výsledkem metody matice rizika jsou v prvním kroku mapy ohrožení, které zobrazují pomocí barevné škály kategorie ohrožení ploch v záplavovém území. Tyto kategorie umožňují posouzení vhodnosti stávajícího nebo budoucího funkčního využití ploch a doporučení na omezení případných aktivit na plochách v záplavovém území s vyšší mírou ohrožení. Tento

postup je možné využít např. v procesu územního plánování, při návrhu opatření na ochranu před povodněmi, apod.

Ohrožení RI (Beffa, 2000)	Kategorie ohrožení	Doporučení
$RI \geq 0,1$ or $IP > 3$	(4) Vysoké (červená)	Doporučuje se <b>nepovolovat</b> novou <b>ani rozšiřovat</b> stávající zástavbu, ve které se zdržují lidé nebo umísťují zvířata. Pro stávající zástavbu je třeba provést návrh opatření na ochranu před povodněmi, které zajistí odpovídající snížení rizika.
$0,01 \leq RI < 0,1$	(3) Střední (modrá)	Výstavba je <b>možná s omezeními</b> vycházejícími z podrobného posouzení potenciálního ohrožení objektů povodňovým nebezpečím. Nevhodná je výstavba citlivých objektů (např. zdravotnická zařízení, hasiči apod.). Nedoporučuje se rozšiřovat stávající plochy určené pro výstavbu.
$RI < 0,01$	(2) Nízké (oranžová)	Výstavba je <b>možná</b> , přičemž vlastníci dotčených pozemků a objektů musí být upozorněni na potenciální ohrožení povodňovým nebezpečím. Pro citlivé objekty je třeba přijmout speciální opatření ve smyslu ochrany před povodněmi.
$IP > 0,0033$	(1) Zbytkové (žlutá šrafura)	Otázky spojené s ochranou před povodněmi se zpravidla doporučuje řešit prostřednictvím dlouhodobého územního plánování se zaměřením na zvláště citlivé objekty (zdravotnická zařízení, památkové objekty apod.). Snahou je vyhnout se objektům a zařízením se zvýšeným potenciálem škod.

Obrázek 9: Barevné škály kategorie ohrožení ploch v záplavovém území [12]

### Mapy povodňového rizika

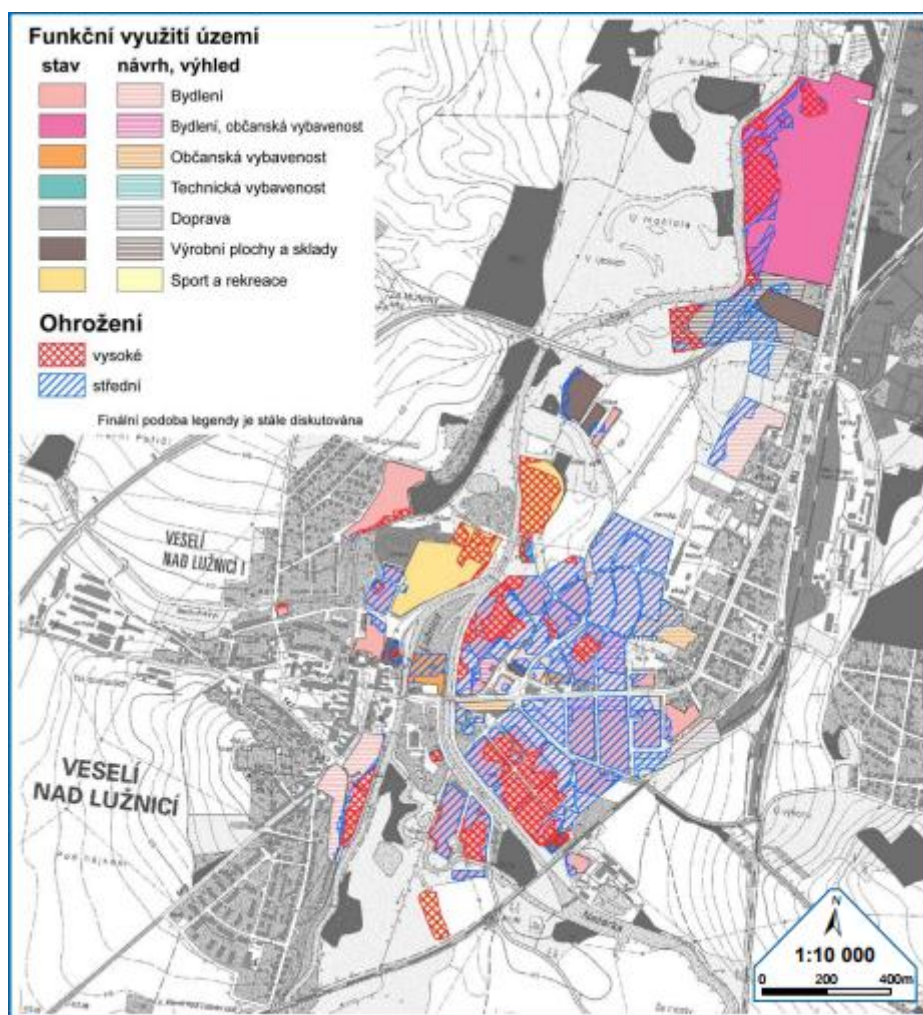
Mapy povodňového rizika kombinují údaje o ohrožení s informacemi o zranitelnosti objektů v exponovaném území. Na základě zranitelnosti, tj. dostupných informací o využití území, jsou vymezeny třídy ploch, kterým jsou přiřazeny hodnoty tzv. maximálně přijatelného rizika. V mapách rizika jsou zvýrazněny ty využívané plochy, na kterých je překročen limit maximálně přijatelného rizika. Uvnitř každé takové plochy jsou vyznačeny dosažené hodnoty ohrožení v uvedené barevné škále.

Třídy funkčního využití území	Maximálně přijatelné riziko
BY - Bydlení	<b>Nízké</b>
DO - Doprava a technická infrastruktura	<b>Nízké</b>
OV - Občanská vybavenost	<b>Nízké</b>
VY - Průmysl	<b>Nízké</b>
ZV - Zemědělská výroba	<b>Nízké</b>
SR - Sport a rekreace	<b>Střední</b>
LE - Lesy, veřejná zeleň	Vysoké
OP - Orná půda, louky, pastviny	Vysoké

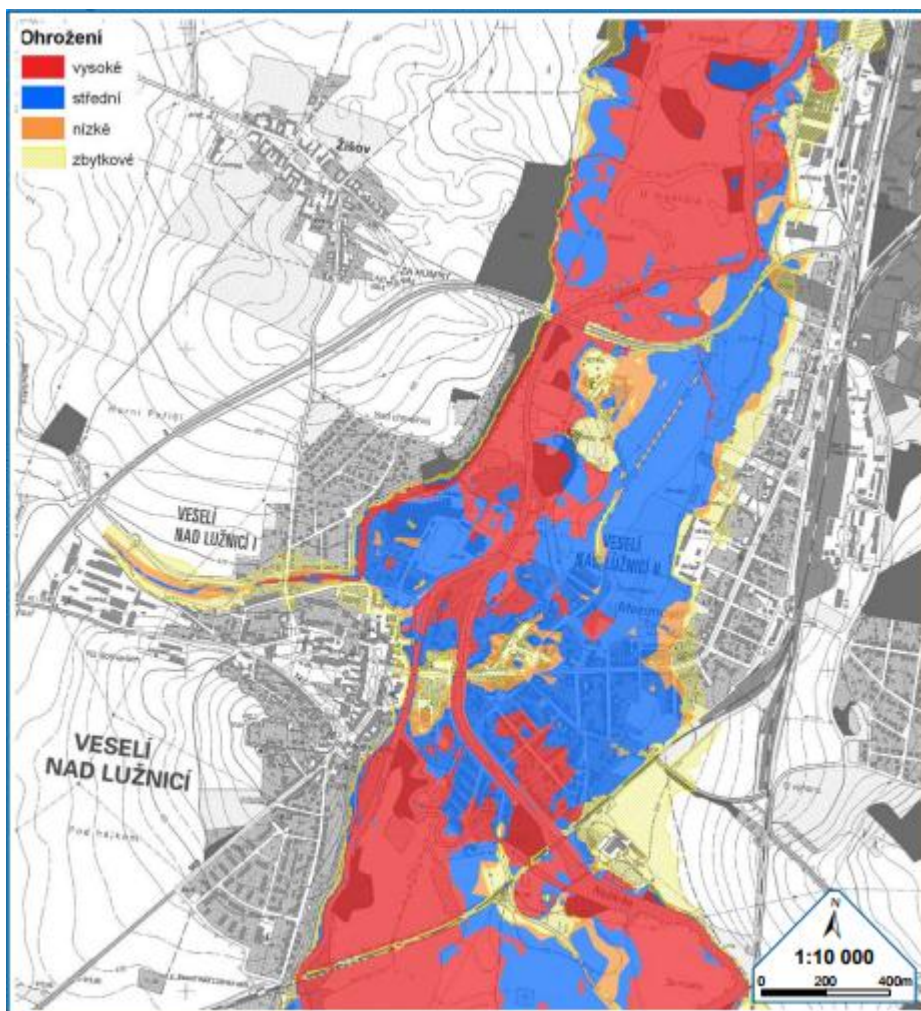
Obrázek 10: Třídy ploch [12]



Tyto identifikovaná území představují exponované plochy při projevu daného scénáře povodňového nebezpečí a odpovídající míře zranitelnosti území. Dalším logickým krokem je podrobnější posouzení „rizikových ploch“ z hlediska zvládání povodňového rizika (snížení rizika na přijatelnou míru) a případné vypracování plánů pro zvládání povodňových rizik.



Obrázek 11: Mapa rizika [12]



Obrázek 12: Mapa ohrožení [12]

[11]

### 3.5 Historie povodní na území Čech, Moravy a Slezska

#### 1118 – První věrohodná zmínka o povodni

První věrohodná zmínka o povodni byla zprostředkována kronikářem Kosmou (1045? – 1125). Kosmas byl zřejmě osobním svědkem události. Podle něj voda vystoupila do výšky více než 5 m (po převodu z pražských loktů) nad podlahu tehdejšího dřevěného mostu.

#### 1342 – Došlo k protržení prvního pražského kamenného (Juditina) mostu

V únoru po tuhé a sněžné zimě, prudkém oteplení a následné povodni byl protržen prvý pražský most, zvaný Juditin.

#### 1432 – Katastrofální povodeň

Příčinou povodně byly silné, několikadenní deště. V Praze byl protržen Karlův most a zatopeno Staroměstské náměstí, a to až nad radnici. K podobné situaci již nikdy od té doby nedošlo.

#### 1501 – Povodeň s největším regionálním rozsahem extrémních letních povodní v oblasti povodí Labe, Dunaje a Odry vůbec

Jako katastrofální je hodnocena kromě Prahy, také ve Vratislavi a Vídni. Zachycena byla tehdy povodí Labe, Dunaje i Odry. Německý nápis na nábřeží ve Znojmě: „1501, so hoch die Thay...“ (1501 tak vysoko Dyje..., zřejmě vystoupila) vyznačoval výšku rozvodněné Dyje.

#### 1582 – Katastrofální příval v Karlových Varech

Rok 1582 přinesl několik povodňových epizod. Ta nejznámější je spojena se zpusťšením Karlových Varů. Příležitostný tisk o této legendární povodni se stal dobovým „bestsellerem“. Zároveň grafika k této povodni, je asi nejstarší obrazový doklad o povodni v Čechách.

#### 1598 – Povodně na jaře, v létě i na podzim

Rok 1598 přinesl v Čechách a na Moravě opakované povodně po celý rok. Přitom dvě epizody byly katastrofální (v březnu a srpnu). Voda vystoupila jen o něco méně než v roce 1501. V Praze vystoupila voda asi 120 cm nad hlavu Bradáče a zatopené bylo staré Město až po dnešní Husovu ulici.

#### 1655 – Velká zimní povodeň

Příčiny a rozsah této velké střeoevropské povodně připomínají roky 1784 a 1845. V Praze se ledové kry dostaly do blízkosti Staroměstského náměstí. Výška Labe je vyznačena dodnes na zámecké skále v Děčíně.

#### 1714 – Katastrofální povodeň na Sázavě

V červenci obrovská povodeň na Sázavě, zahynulo 200 lidí, výška vody byla vyznačena plastikou Bradáče v Havlíčkově Brodě.

#### 1784 Legendární zimní povodeň

Prudká obleva provázená vydatným deštěm dala do pohybu katastrofální povodeň. Karlův most tentokrát odolal i ledovým krám o tloušťce přes 1 metr, do vody spadlo ale několik soch a strážnice s vojáky (jak ostatně ukazuje rytina).

#### 1890 – Stoletá povodeň

Příčinné srážky této povodně měly podobné rozložení jako v roce 2002. Do roku 2002 to byla asi nejvíce připomínaná pražská povodeň. Není divu, protrhla Karlův most, a to přesto, že vodní stav byl asi o 50 cm nižší než za povodní v letech 1784 a 1845.

#### 1997 – Katastrofální povodně na Moravě

Povodně na Moravě proměnily pohled veřejnosti i politické sféry na tento přírodní fenomén. Po 90leté odluce přišly extrémní události znovu s ničivou silou.

#### 2002 – Povodeň v srpnu 2002

Povodeň překonala v Praze všechny předchozí případy od roku 1432, díky novým mobilním bariérám nepronikla však voda na Staroměstské náměstí.

[13]

#### 2006 – Jarní povodně

K povodni došlo na velké části území České republiky a širšího území střední Evropy na přelomu března a dubna. Povodeň byla způsobena kombinací vydatných srážek a prudkého oteplení, které vedlo k rychlému tání sněhové pokrývky. [14]

#### 2009 – Třetí nejhorší povodňová katastrofa

Letní povodeň, která začala 23. června, si vyžádala 13 lidských životů a škody podle odhadu přesáhly 5,6 miliard korun. [15]

#### 2010 – Květnové povodně na severní Moravě a stav nebezpečí v Libereckém a Ústeckém kraji v srpnu 2010

V květnu povodně zasáhly severní Moravu a střední Evropu. Později v srpnu, ve městě Mimoň na Českolipsku hladina řeky Ploučnice dosáhla svého historického maxima, když 8. srpna v 8 hodin ráno vyšplhala na rekordních 252 cm. Krizové a povodňové štáby během noci vyhlásily rychle za sebou jednotlivé tři stupně povodňové aktivity. [16,17]

#### 2013 – Letní povodně

Probíhala ve třech navazujících vlnách: první od 29. května do 5. června po několikadenním dešti především v oblasti Středočeské pahorkatiny, ale i na severozápadě a severovýchodě Čech, druhá a zdaleka ne tak intenzivní přišla v důsledku intenzivních lokálních dešťů do nasycených jihočeských povodí od 10. června do 12. června a třetí, nejslabší vlna od 24. června do 27. června 2013 v oblasti Krkonoš, Jizerských hor a Českomoravské vrchoviny. [18]

### 3.6 Povodně ve světě

Čína: Huang Ho (Žlutá řeka) zabila více lidí, než kterákoli jiná řeka na světě. V roce 1931 se utopili 4 miliony lidí a miliony dalších připravila o střechu nad hlavou. V roce 1939 zahynulo dalších milion lidí. Důvodem byl vysoký obsah naplavenin v řece. Při délce toku řeky 4830 km tvoří naplaveniny plných 60 % jejího objemu. V roce 1996 se ze břehů vylila řeka Yangtze, kde zahynulo téměř 2300 lidí a dalších 2,36 milionů zůstalo bez střechy nad hlavou. Hladina řeky stoupla na 28,6 m.

Minnesota: V roce 1986 – nejhorší záplavy za posledních 30 let. Jen na západě regionu Des Moines, bylo použito přes 1,5 milionu pytlů s pískem. Rozlitá řeka zaplavila 23 milionů akrů půdy. Zahynulo 50 lidí a způsobené škody byly vyčísleny na 10 miliard dolarů.

Pákistán: V roce 1998 způsobily silné jarní deště v jihozápadním Pákistánu vylití řeky Dasht a následné rozsáhlé záplavy. Zahynulo na tisíce lidí. Bahno zničilo všechny osady na březích řek Dasht, Kech a Nininy v úseku dlouhém 500 km.

Nizozemí: V roce 1953 zničila přílivová bouře 500 km ochranných hrází podél holandského pobřeží. Přílivová vlna téměř okamžitě zatopila 133 domů a pokračovala dále do vnitrozemí, kde zaplavila území o rozloze 1600 km<sup>2</sup> (6 % holandské zemědělské půdy). Zahynulo 1800 lidí, bylo zničeno 43000 domů a utopilo se na 50000 kusů dobytka. [8]

### 3.7 Významné události v ČR

Nejvýznamnější událostí v České republice se staly ničivé povodně roku 2002, které přímo či nepřímo ovlivnily většinu obyvatel naší země. Rozvodněné řeky v měsíci srpnu způsobily velké škody a prověřily schopnost našeho národa zvládat krizové situace. Zasaženy byly města a obce, mezi které se zařadily Troubky, Horažďovice či České Budějovice.

Statistiky

Hlavní povodni předcházela ve dnech 7. až 9. srpna lokální zátoka na jihu Čech. Poté se zdálo, že vše odeznělo, ale znovu nastaly intenzivní deště, které zvedly hladiny řek (zejména Vltavy a Berounky) a způsobily mnohem mohutnější povodně.

Potopa, která Českou republiku postihla, si v celkovém součtu ve dnech od 7. do 16. srpna, vyžádala 16 lidských životů, 215 tisíc obyvatel muselo opustit své domovy, na záchranné práce bylo nasazeno 7 tisíc hasičů, 4,5 tisíce vojáků a 4 tisíce pořádkových policistů. K pomoci se přidali i tisíce dobrovolníků a bylo zřízeno celkem 27 humanitárních kont. Povodní bylo

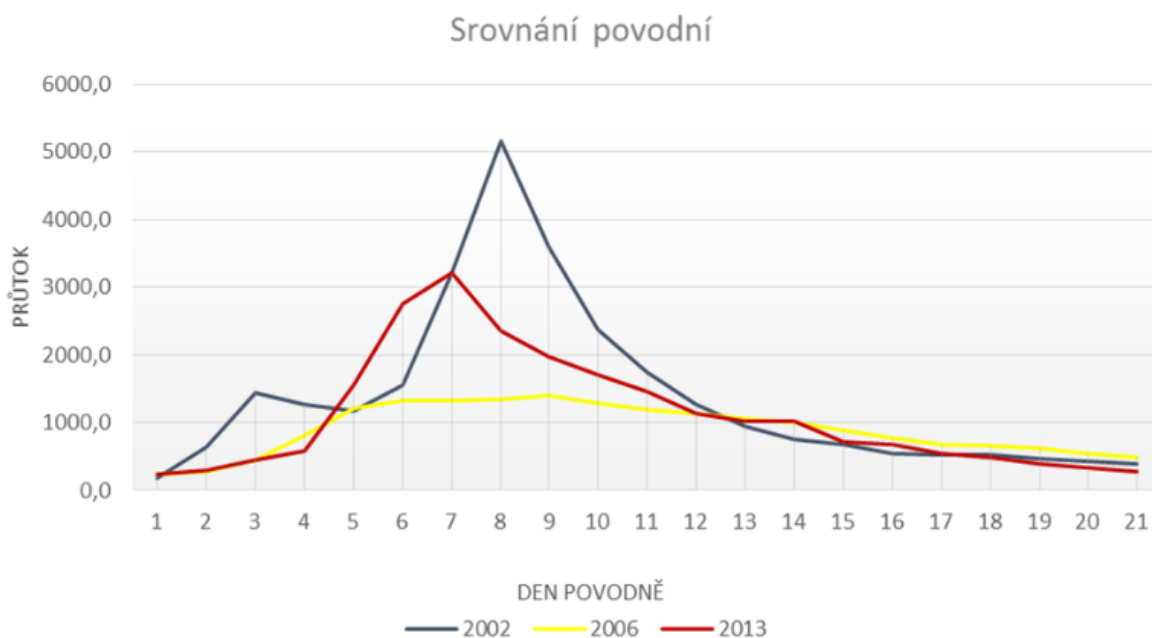
zasaženo 446 obcí, zcela pod vodou se octilo 99 z nich. Celkové vyčíslení škod se nyní ustálilo na 90 miliardách. Pomoc přicházela i ze zahraničí: Evropská unie poskytla České republice okamžitou pomoc ve výši 58 milionu eur. [8]

### 3.7.1 Povodně v roce 2002

Statistický přehled:

- 17 lidí přišlo o život,
- 134 zvířat z pražské ZOO přišlo o život,
- v 6 krajích byl vyhlášen nouzový stav,
- 753 postižených obcí,
- 225 000 evakuovaných lidí,
- 73,3 mld. Kč škod, z toho přes 6 mld. Kč pražské metro,
- nejvyšší průtok na Vltavě v Praze 5300 m<sup>3</sup>/s.

[19]



Obrázek 13: Porovnání povodní z hlediska průtoku v letech 2002, 2006 a 2013 [20]

#### *Průtok vody na řece Labi*

V přehledech dat o průtoku vody v Labi přibýlo důležité číslo: 16. 8. 2002. Je tomu přesně 15 let, co kulminovala hladina a dosáhla 1196 cm. Při běžném stavu řeky je průměrná výška hladiny jenom 248 cm. Vodohospodáři vyhláší nejvyšší 3. stupeň povodňové aktivity při



600 cm. Při povodni 29. 3. 1988 dosahovala hladina řeky Labe výšky 757 cm, v roce 1940 hladina vystoupala na 923 cm. [21]

### **3.7.1.1      *Pohled meteorologa na vznik povodní v roce 2002***

Před patnácti lety, v srpnu 2002, postihly Českou republiku katastrofální záplavy, které si vyžádaly 17 lidských životů. Zasažena byla více než třetina území státu, nejvíce utrpěly jižní, střední a severní Čechy. Velká voda se však nevyhnula ani Moravě, která se stále vzpamatovala z povodní, jež ji zasáhly v roce 1997.

Meteorolog České televize Vladimír Piskala uvádí, že za trvalý a vydatný déšť může shoda několika okolností.

Už na konci července byl v Evropě velmi teplý a vlhký vzduch – způsobovalo to silné bouřky i extrémní déšť v Německu, který tam vedl k extrémním přívalovým deštům. Klíčovým se ukázal vznik tlakové níže, což je meteorologický útvar, který vždy znamená trvalejší déšť.

Začala se formovat daleko od nás, až nad Janovským zálivem v Itálii. S ní k nám přišel teplý a zejména vlhký vzduch. V Dolním Rakousku kvůli tomu začalo intenzivně pršet, intenzivní srážky tam dorazily 6. srpna. Mezi 6. a 7. srpnem už pršelo také na jihu a jihozápadě Čech a na severovýchodě Německa. Srážek bylo ohromné množství, šlo o více než 100 litrů na metr čtverečný. Už to bohatě stačilo na to, aby vznikly povodně.

A ony vznikly, objevily se především na dolních tocích řek, zejména na Labi, kde byl vyhlášen třetí povodňový stupeň. Samotná tlaková níže, která vše způsobila, se pak odsouvala směrem na východ – mimo jiné způsobila například povodně v Rusku. Jenže u nás pršelo dál.

V té době totiž vznikla další tlaková níže, původně západně od Irska. Byla úplně normální, nijak silná, ale pak se přesunula opět nad Janovský záliv, kde výrazně zmohutněla. A odtamtud se znovu vydala na sever, nad území České republiky. A v ten moment už bylo z meteorologického hlediska jasné, že se blíží povodně.

Nakonec se počasí ukázalo být ještě horším, než to zpočátku vypadalo. Deště napadlo ještě více než poprvé a navíc již kapky padaly do nasycené půdy, která nebyla schopná přijímat další vláhu. V Německu napršelo 12. srpna za 24 hodin dokonce 312 litrů vody na metr čtverečný, což byl nový německý rekord. Tento extrémně silný příval deště dozníval až do 15. srpna, přesouval se ale na sever a také slábl. Kvůli nasycenosti půdy od minulého deště vlastně všechna voda, která spadla, tak i otekla – do lidmi obývaných míst.

Tento meteorologický scénář se může opakovat. Postup níže ze severní Itálie do střední Evropy se objeví v průměru dvakrát až třikrát za rok. Pro představu, mezi lety 1979 a 2013 se v Evropě objevilo 3448 tlakových níží. Cestou z Itálie k nám se jich vydalo jen 82, přičemž zhruba každá čtvrtá znamenala silný nebo extrémní déšť. Rok 2002 byl vlastně výjimečný jen tím, že pršelo do již nasyceného povodí.

[22]

### 3.7.1.2 *Postižené obce*

#### Zářečí, malebná část Bechyně

Data 1890, 1940, 2002, 2006, 2013. To jsou všechno roky, kdy domy v romantické čtvrti pod bechyňským panstvím vypláchla Lužnice.

Sedmašedesátiletý Antonín Alexa má na svém domě v bechyňské čtvrti Zářečí u řeky Lužnice malovanou, keramickou tabulku. To, co připomíná, je však smutné. Na desce má zaznamenané povodně z roku 2002. A o metr níže je deska s ryskou, která ukazuje výšku vody v roce 2013. Jeho dům plaval už několikrát. Od poslední velké vody v roce 2013 je řádění divokého živlu na domech vidět dodnes.



Obrázek 14: Keramické tabulky připomínající povodňovou událost [23]

V roce 2013 přišla voda rychle, nečekaně a agresivně ze všech stran. Na domy v Zářechí se valila z řeky, protože nové protipovodňové mobilní zábrany nestačilo město postavit včas, z nové kanalizace, ve které chyběly zpětné klapky bránící proudu vody dostat se z trubek, z okolních svahů a polí „dovezla“ i bahno.

Po dvou letech je stále mokrá podlaha a vlhkost z ní se tlačí do zdí. Dělá to mapy a Antonín Alexa nevěří, že by se to vůbec kdy vysušilo. Na domě u jeho souseda je od vody dodnes patrná špinavá čára. Než povodeň přišla, tak měl úplně novou fasádu. Z neustálých oprav je už zdrcený a stěhování odmítá, jelikož se zde narodil.

Na rohu u mostu vedoucího na malou návěs stojí dům, který je řece nejbližší ze všech. V přízemí má už 22 let pronajatý prostor pro keramickou dílnu Milan Voborský. Na vodu se podle něj nikdo nemůže připravit, ledaže do přízemí stejně jako on nakoupí starší vybavení, které mu pak není líto vyhodit. Voda přichází jak z řeky, tak z okolí. Lidé, kteří zde bydlí, počítají s tím, že se může řeka vylít a přijít povodeň. Navzdory tomu se většina z nich odsud stěhovat nechce.

V polovině ulice v domě, který ještě nemá fasádu a neměl ji ani při povodních, bydlí Renata Šafratová s přítelem. Ten se tam narodil, ona se přistěhovala v roce 2014. Povodně tu nezažila, ale je ráda, že nyní čas od času hasiči zkoušejí namontovat mobilní protipovodňové zábrany.

Další sousedka přitom popisuje problémy, které kvůli vyplavení domu přetrvávají. Vysoušeče měly zapnuté naplno, spotřebovaly spoustu elektřiny, ale přesto je pořád zdivo vlhké. Ve všech pokojích mají na zdech mapy od vody. Netuší, kdy to přijde znovu a jak je ochrání nebo neochrání protipovodňové zábrany.

Právě ty byly při povodních v roce 2013 klíčové. Byly úplně nové, stejně jako betonová zídka podél řeky, na kterou se montují. Zábrany měly obyvatelům domů pomoci, jenže než je město vyndalo ze skladu a dobrovolníci spolu s hasiči přišli na to, jak je postavit, už bylo pozdě. Domy už byly zaplavené a zábrany se tak stavěly už ve vodě, kdy prostě neměly smysl. Podle některých obyvatel pak fungovaly přesně obráceně: vodu ještě držely mezi domy.

Bechyňská radnice nyní věří, že je na situaci lépe připravena. Montování zábran cvičila na podzim 2014 a poté v březnu 2015. Starosta Pavel Houdek, který je ve funkci od podzimních voleb 2014 plánuje čištění koryta řeky u vodní elektrárny. Pořídil automobil na odvoz biologického odpadu, který bude využíván i pro převoz mobilních protipovodňových zábran, takže by mělo být vše rychlejší.

## Zálezlice

Malá obec ve středočeském kraji ležící nedaleko Neratovic se 411 obyvateli. Pět kilometrů za jejími hranicemi se do Vltavy vlévá Labe. Tuto obec dvakrát spláchla povodeň, také se stala symbolem té nejhorší před patnácti lety. Přezdívalo se jí moravské Troubky, které přírodní katastrofa zasáhla v roce 1997. Zálezlice neušetřila ovšem velká voda ani před čtyřmi lety.

Každodenní život se zde odehrává tak, jakoby se každou chvíli měla přihnat další povodeň. Místní zde bydlí a smířili se, že povodeň může přijít kdykoliv a podle toho uzpůsobili svá obydlí. Obytnou část domu mají až v prvním patře, dole mají garáž. Na zahradách nemají skoro žádné věci. Protipovodňové strategii podlehl i kulturní dům, který v případě potřeby slouží jako zázemí pro hasiče. V prvním patře se nachází provizorní ubytovna.

Základy nových domů tvoří železo a beton. Osmdesát centimetrů betonu a železa jde do země a stejně nad zem. O střechu nad hlavou přišla v srpnu 2002 většina lidí z obce. Celkem spadlo 121 domů a hospodářských stavení. Dvě třetiny obce zdemolovala voda. Některé budovy vypadaly, že se zachrání, ale když voda opadla, zjistilo se, že mají špatnou statiku a musely se srovnat se zemí. Tehdy škody vyšplhaly na 200 milionů korun.

Místu dominuje autobusová zastávka, okolo které místní projížděli před patnácti lety na člunu v takové výšce, že jí hleděli na střechu. Zastávka je proto celá vymalovaná modře a stylizovaná do vodního světa. Vedle vodníků a ryb se vyjímají rysky, kam až dosáhla voda právě v letech 2002 a 2013.

[24]



Obrázek 15: Autobusová zastávka zachycující povodně v letech 2002 a 2013 [24]

### 3.8 Finanční škody způsobené povodní

Stát může, pokud došlo k narušení základních funkcí v území v důsledku živelní (povodeň) nebo jiné pohromy, která je mimořádnou událostí, na základě níž byl vyhlášen stav nebezpečí nebo nouzový stav, poskytnout krajům, obcím, dalším právnickým osobám, s výjimkou právnických osob hospodařících s majetkem státu, a fyzickým osobám státní pomoc na obnovu majetku sloužícího k zabezpečení základních funkcí v území. Státní pomoc lze poskytnout až do výše nákladů, jež je nezbytné vynaložit na obnovu majetku poškozeného pohromou nebo na pořízení nového majetku, který bude plnit tutéž základní funkci jako majetek zničený pohromou. [25]

Povodněmi v červnu 2013 bylo různou měrou dotčeno téměř 1 400 obcí v 10 krajích (včetně hlavního města Prahy). Celková plocha těchto obcí představuje 21 633 km<sup>2</sup>. V roce 2013 měly tyto obce téměř 4 miliony obyvatel. V průběhu této povodňové situace bylo podle Přehledů odhadů nákladů zasaženo téměř 7 tisíc objektů určených k bydlení (rodinné i bytové domy), z nich minimálně 64 bylo určeno k demolici (uvedeno v tabulce níže). Nejvíce z tohoto pohledu byly zasaženy kraje Středočeský a Ústecký, kde bylo poškozeno (nebo zničeno) skoro tři tisíce (respektive dva tisíce) obytných objektů. U ostatních krajů bylo zasaženo povodněmi v červnu 2013 maximálně do 600 obytných objektů. [25]

Tabulka 1: Přehled poškozených (zničených) obytných objektů při povodních v červnu 2013

Kraj	Bytové domy		Rodinné domy		Celkem
	poškozené	k demolici	poškozené	k demolici	
Jihočeský	50	0	547	1	<b>598</b>
Královehradecký	11	0	579	1	<b>591</b>
Liberecký	0	0	1	0	<b>1</b>
Plzeňský	7	0	176	0	<b>183</b>
Středočeský	284	3	2 377	58	<b>2 722</b>
Ústecký	360	0	1 663	1	<b>2 024</b>
Hlavní město Praha	145	0	451	2	<b>598</b>
<b>Celkem</b>	<b>857</b>	<b>3</b>	<b>5 794</b>	<b>63</b>	<b>6 717</b>

[25]

Tabulka 2: Podíl celkových škod na bydlení při povodních v červnu 2013

Kraj	Bydlení	
	tis. Kč	%
Jihočeský	62 162	3,1

Královehradecký	86 524	9,9
Liberecký	705	0,1
Plzeňský	5 017	1,8
Středočeský	583 932	14,3
Ústecký	562 627	16
Hlavní město Praha	289 744	7,5
<b>Celkem</b>	<b>1 590 711</b>	<b>10,5</b>

[25]

### Vyčíslení škod podle vlastníka poškozeného majetku

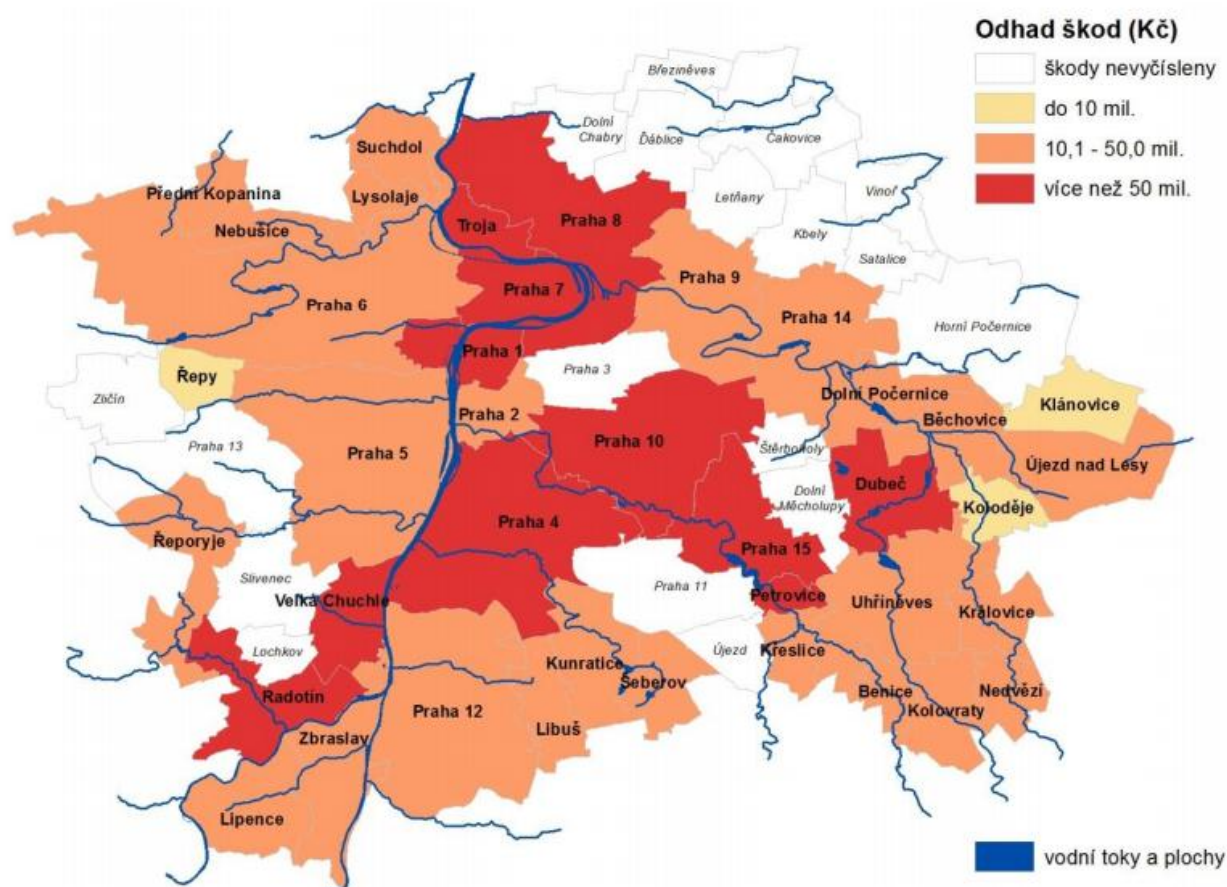
Při povodních v červnu 2013 byla téměř polovina škod zaznamenána na majetku obcí, a to především na majetku hlavního města Prahy, kde škody na majetku města dosáhly 60 %. V ostatních krajích byly významné i škody na majetku státu, v Královehradeckém a Libereckém přesáhly 40 respektive 30 %. Údaje jsou uvedeny v tabulce níže se zaměřením na škody na majetku fyzických osob. [25]

Tabulka 3: Podíl škod na majetku v jednotlivých krajích podle vlastníka (tis. Kč)

Kraj		Vlastník					
		Stát	Kraje	Obce	Podnikatelské subjekty	Fyzické osoby nepodnikající	Právníkové osoby nepodnikající
Jihočeský	(tis. Kč)	165 251	142 628	1 088 704	531 579	76 727	7 758
	(%)	8,2	7,1	54,1	26,4	3,8	0,4
Královehradecký	(tis. Kč)	381 194	106 717	248 295	22 339	112 270	930
	(%)	43,7	12,2	28,5	2,6	12,9	0,1
Liberecký	(tis. Kč)	174 925	244 430	145 417	1 460	1 845	332
	(%)	30,8	43	25,6	0,3	0,3	0,1
Plzeňský	(tis. Kč)	23 018	91 708	124 496	25 462	9 355	5 331
	(%)	8,2	32,8	44,6	9,1	3,3	1,9
Středočeský	(tis. Kč)	355 429	1 142 528	1 415 814	389 157	731 467	57 125
	(%)	8,7	27,9	34,6	9,5	17,9	1,4
Ústecký	(tis. Kč)	1 027 314	111 267	1 155 786	512 781	707 490	8 470
	(%)	29,2	3,2	32,8	14,6	20,1	0,2
Hlavní město Praha	(tis. Kč)	226 629	0	2 318 393	989 560	213 941	92 961
	(%)	5,9	0	60,4	25,8	5,6	2,4
<b>Celkem</b>	<b>(tis. Kč)</b>	<b>2 353 760</b>	<b>1 839 278</b>	<b>6 496 905</b>	<b>2 472 338</b>	<b>1 853 095</b>	<b>172 907</b>
	<b>(%)</b>	<b>15,5</b>	<b>12,1</b>	<b>42,8</b>	<b>16,3</b>	<b>12,2</b>	<b>1,1</b>

[25]





Obrázek 16: Městské části hlavního města Prahy postižené povodněmi v červnu 2013 a odhad škod na jejich území [25]

### 3.9 Vhodné domy do záplavových oblastí

Lidé žijící v záplavových oblastech, musí počítat s tím, že může v jejich prostředí dojít k povodni. Hydrometeorologický ústav disponuje mapami, které zobrazují, kde se vyskytují záplavové oblasti. Kdekdo by si pomyslel, že když nám jsou tyto informace dostupné, tak je hloupé v těchto oblastech bydlet nebo hůř, stavět si zde bydlení.

Pro všechny obyvatele v těchto oblastech, to jistě nemusí být tak jednoduché jak by se mohlo zdát. Lidé zde mají své rodiny, mohou mít citové pouto k místu, kde žijí a také zde mohou mít práci, které se nechtějí vzdát. Vyskytuje se otázka, když už se zde někdo rozhodne bydlet, tak jaké bydlení je zde vhodné? Zda takové vůbec existuje?

Pokud vlivem povodní dojde k výraznému poškození, je lepší místo oprav postavit nový dům, ve kterém bude spodní podlaží (záplavové) s minimem nábytku a hodnotných věcí. Takový prostor může sloužit jako letní společenská místnost, garáž nebo sklad. [26]

Pro stavbu v záplavové oblasti je nejrozsudnější použít železobetonový skelet založený na základových roštích, kdy jsou jednotlivé patky sloupů spojeny. To výrazně posílí odolnost budovy v případě návalové vody. Toto podlaží je lepší nechat zcela otevřené (beze stěn), nebo postavit lehké obvodové stěny, například jednoduché dřevěné. To z důvodu, aby výplňové stěny nefungovaly jako pevná hráz proti přílivové vlně. Poté by mohlo naneštěstí dojít k ohrožení statiky celé budovy. Lehké výplňové stěny vodě buď odolají a po jejím zmizení se konstrukce vysuší, nebo je voda od skeletu oddělí. Narušení statiky poté nehrozí. Po opadnutí hladiny je třeba myslet na odvodnění. Zde se vyplatí použít vhodně zvolené odtokové otvory, případně odtokové kanály zakončené přečerpávací šachtou. [26]

Na obrázku níže lze vidět první podlaží (nebo suterén), na kterém se dá stavět další podlaží, ale s ohledem na co nejmenší hmotnost. Při ohrožení tzv. únosnosti základové půdy, což bývá při větší povodni velmi časté, totiž hrozí pohyb v základové spáře (tedy tam, kde leží základ domu). Toto riziko se zvyšuje s každou další tunou hmotnosti. Proto se doporučuje stabilní nosná konstrukce s minimální plochou v záplavovém podlaží a lehčí stavba v dalších podlažích. Na nosnou konstrukci skeletu v záplavovém podlaží je možné kromě železobetonu doporučit i dřevo, zejména v případě obecně nízké únosnosti základové spáry. [26]



Obrázek 17: První podlaží domu [26]

Další možností je dům stavěný difúzně otevřeným systémem. Taková konstrukce je levnější než železobeton. Jednotlivé konstrukční profily navíc při krátkodobém zatopení vyschnou rychleji než beton, samozřejmě za předpokladu, že je odkryjeme.



U dřeva je nutné důsledné šikmé ztužení dřevěného skeletu a také jeho důsledné ukotvení k základovému roštu (zejména proti vytrhnutí/nadzvednutí konstrukce). Taková konstrukce je potom staticky mnohem odolnější proti dynamickému namáhání než klasický stěnový systém, obdobně jako při zemětřesení. [26]

Jestliže dům mohou ohrozit jen menší záplavy, je vhodné dům opět posadit co nejvýš. Postačí násep a vyšší rozdíl úrovně nadzemního podlaží a okolního terénu. Někdy pouhých deset centimetrů zabráni rozsáhlým škodám. [26]

Z tzv. klasických technologií nejsou vhodným materiálem pro stavbu nosných konstrukcí v nebezpečných oblastech nasákavé materiály, které obtížně a dlouho vysychají. Děrované cihly, zejména ty lehčené, stejně jako lehčené plynosilikáty. Pro domy vybudované z těchto materiálů znamená i malá povodeň velký problém. I po dlouhém vysychání v nich bude cítit zápach, jelikož se uvnitř zdí zachycují i nečistoty a škodliviny. Výjimkou jsou plné cihly, pokud výrobce garantuje velmi malou nasákavost, mají šanci při krátké povodni obstát. Nejvhodnější z “těžších“, klasických materiálů vychází již jednou zmíněný železobeton. Je možné do něj přidat přísady zabezpečující vodotěsnost. Na rozdíl od stěny z plných cihel má homogenní strukturu, takže riziko rozpadnutí stěny vlivem např. týdenní povodňové hladiny vody zasahující konstrukci je mnohokrát menší. [26]

Samotný železobeton pro obytnou stavbu nestačí (tepelná izolace), při návrhu venkovních i vnitřních vrstev sendviče je nutné myslet na jejich snadnou rozebíratelnost. Do exteriéru je zcela nevhodnou venkovní povrchovou úpravou omítka. Je nasákavá a její zasažení znamená rekonstrukci velké části nebo i celé plochy omítky kvůli vzhledu, napojení vrstev apod. Naopak velmi vhodné jsou palubkové obklady, v případě venkovních deskových obkladů je třeba volit typy s téměř nulovou nasákavostí. Rozumnou volbou je horizontální skladba desek, aby v případě zničení vodou nebylo nutné měnit desky na celou výšku podlaží. [26]

Jak již bylo uvedeno, nejvhodnějším materiálem pro stavbu domů je železobeton. Ovšem jeho nevýhodou je vyšší cena a za určitých podmínek i jeho vysoká hmotnost. Další možností je dřevostavba. Moderní dřevostavby s difúzně otevřeným systémem představují jednu z nejvhodnějších technologií pro realizaci staveb v záplavových oblastech. Difúzně otevřená konstrukce totiž nemá parozábranu, pouze parobrzdu, tedy vrstvu s nižším difúzním odporem než parozábrana, ale ještě dostatečnou pro zachycení prostupu nasycených vodních par do konstrukce. Taková konstrukce stěny dřevostavby nemá žádnou PVC nebo hliníkovou fólii, místo ní se používá např. OSB deska. Za touto vrstvou pak již nesmí následovat žádná vrstva

s vysokým difúzním odporem (třeba OSB deska nebo difúzně nepropustná omítka, např. akrylátová), aby se případná vlhkost v konstrukci neuzavřela. [26]



Obrázek 18: Dům stavěný difúzně otevřeným systémem [26]

Hlavní výhodou difúzně otevřené skladby spočívá v tom, že vlhkost, která by se v konstrukci objevila, se během určitého období (v závislosti na jejím množství a na venkovních podmínkách) z konstrukce opět odpaří. Taková skladba dřevostavby má větší šanci se vyrovnat s krátkodobým zatopením než konstrukce, do níž se voda jednoduše dostane, ale pak v ní zůstane. V této situaci nastává problém s jejím vysušením, protože voda či vlhkost zůstane uzavřena mezi dvěma zcela neprodyšnými vrstvami. To zákonitě vede k poškození výplňových materiálů v dřevěné konstrukci, ale co je závažnější, může velmi rychle dojít k degradacím na nosné konstrukci objektu, k plísním a hnilobě. [26]

Po opadnutí vody je nutné rozebrat konstrukci stěny a odkryt hlavní dřevěnou nosnou kostru. Urychlí se vysušení dřeva a po jeho napuštění ochrannými prostředky proti houbám, plísním a bakteriím je možné konstrukci opět tzv. zaklopit, většinou samozřejmě novými materiály. Tuto obnovu navíc neumožňují všechny materiály, například nelze znovu použít sádkokarton nebo dřevěný deskový materiál, který se nabobtná a zkrouť. K obnově jsou využitelné tepelné izolace, venkovní palubkový obklad včetně laťování nebo difúzní fólie. Dřevěnou nosnou kostru lze zaklopit až poté, kdy vlhkost ve středu profilů nepřesáhne v žádném místě 18 %. Pozor, klasické vlhkoměry měří pouze povrchovou vlhkost, je proto třeba měřit např. přes zatlučený hřebík, který vede elektrické impulzy až ke středu profilu. I po opětovném zaklopení je ale třeba sledovat stav vlhkosti v konstrukci a po nějaké době provést kontrolní sondy do konstrukce. Z důvodu, jestli je vše v pořádku a není v ní přítomna plíseň nebo hniloba. Fázi

vysušení lze v případě vysoké vlhkosti venkovního prostředí provést směrem do interiéru, kdy se ponechá venkovní zaklopení (jako dočasná ochrana, později je bude nutno demontovat) a v interiéru se použije vysoušeč. I když tento postup vypadá na první pohled složitě, je třeba vzít v úvahu, že zničeny jsou pouze výplňové materiály, a to dokonce někdy ne zcela. Nosná kostra odolá za předpokladu správného postupu obnovovacích prací v podstatě vždycky. Právě to je nejzásadnější přednost oproti zděné stavbě, kdy je zasažena homogenní, prakticky nerozebíratelná nosná konstrukce. Tam je situace, zejména u více nasákavých stavebních materiálů, mnohem složitější.

Ke konzultaci jak postupovat při obnově stavby je vhodné přizvat kromě odborníků na vysoušení také statika a projektanta, který stavbu projektoval. [26]



Obrázek 19: Dům, kde nebyla použita omítka [26]

## Experimentální část

Experimentální část navazuje na práci Karolíny Mayerové. V jednotlivých experimentech se využívají skleněné nádoby s hrdlem o průměru 6 cm. Každá skleněná nádoba obsahuje závaží, které zatěžuje sklenici při aplikaci do HT trubky naplněné vodou. Jednotlivé trubky jsou vysoké 1 m a 1,5 m. Dno trubky je opatřené zátkou, aby voda nemohla uniknout. Skleněná nádoba se vzorkem byla následně spuštěna pomocí lněného provázku na dno HT trubky, kde byla zatížena

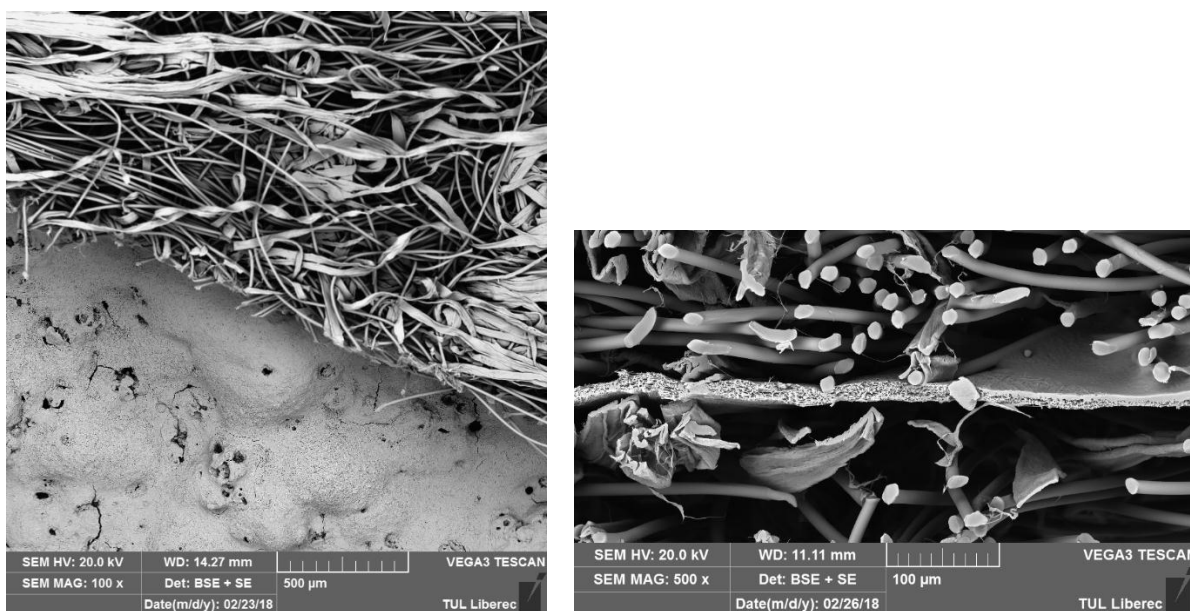
vodním sloupcem. Jednotlivé trubky se skleněnou nádobou uvnitř byly naplněny vodou až po okraj, aby se zajistil stejný tlak na vzorek.

## 4. Charakteristika testovaných materiálů

V experimentech se testovaly dva hlavní materiály, a to nanovláknenná membrána a geopolymery. Dále jejich kombinace a různé použití geopolymery s příměsí hliníku, kde hliník tvořil určité procento z celkového složení směsi (0,5 % – 1 %).

### 4.1 Nanovláknenná membrána

Jedná se o membránu II. generace vyrobenou z polyuretanových vláken. Membrána byla využita pro samostatné testování z hlediska propustnosti vody při určité době zátěži vodním sloupcem, ale také v kombinaci s geopolymery. Membrána byla testována uvnitř geopolymery nebo na jeho povrchu. Na obrázku 20 je vyobrazený mikroskopický snímek vzorku geopolymery s nanovláknennou membránou na povrchu (vlevo) a snímek nanovláknenné membrány v řezu (vpravo).



Obrázek 20: Geopolymer s membránou (vlevo) a nanovláknenná membrána v řezu (vpravo)

### 4.2 Geopolymer

Geopolymer lze považovat za jakýkoli kámen vytvořený uměle, a to s takovou dokonalostí napodobení, že se od přírodního dá rozlišit jen vysoce specializovanou analýzou. Geopolymery nabízejí široké a různorodé uplatnění.

Pro svou extrémní odolnost mohou sloužit jako vynikající izolace a stavební materiál (první aplikace ve stavebnictví pocházejí z let 1972–1976, kdy byl geopolymer nanášen na dřevotřískové desky, aby zvýšil jejich ohnivzdornost). V brzké době lze očekávat využití

geopolymerů při výstavbě silnic, mostů, budov a jiných původně betonových staveb. Mechanické vlastnosti geopolymerů hlavně pevnosti v tlaku rostou i v časovém období 360-520 dnů (vývoj pevností je sledován již devět let) a vykazují minimální smrštění.

Už nyní se tyto materiály využívají rovněž v jiných oborech např. na výrobu výfukového potrubí vozů Formule 1 nebo na výrobu tepelných štítů pro raketoplány. A do budoucna může být velmi podstatná stabilizace nebezpečných a radioaktivních odpadů pomocí geopolymerních matic (tzv. solidifikace) nebo schopnost zpracovat jako surovinu pro výrobu geopolymerů (alkalicky aktivovaných materiálů) odpadní produkty z teplárenských a energetických provozů.

## **Výroba**

Geopolymery se obecně vyrábějí alkalickou aktivací vhodného materiálu, což jsou např. odpadní materiály jako elektrárenský popílek a různé strusky anebo materiálů již využívaných v betonářském průmyslu jako např. metakaolin a Portlandský cement (PC). Nejčastěji se využívají a zkoumají jejich různě připravené směsi spolu s plnivem (kamenivem a výztuží) ve snaze nalézt kombinaci s co nejlepšími vlastnostmi.

Na světě existují ložiska pro výrobu geopolymerů, která se už nemusí aktivovat (tedy tepelně zpracovat při teplotě 600–700 °C). Znamená to, že pak při výrobě geopolymerů nevznikají žádné emise. V tuto chvíli jsou známa dvě taková ložiska. První se nachází v Austrálii, druhé v České republice.

Český triumf pro ekologickou výrobu geopolymerů představují haldy lupku poblíž Zbůhu u Plzně. Lupek je odpad z těžby černého uhlí. Původně se nacházel ve slojích (vrstvách) nad vrstvami uhlí. Na haldách u Zbůhu je ho tolik, že by dokázal nahradit poptávku po cementu pro celou Českou republiku zhruba na 20 let. Přesto v nejbližší době půjde jen o doplněk výroby cementu byť výslednou kvalitou nesrovnatelně lepší a ekologicky významný. [27]

Geopolymery vyráběné v Českých lupkových závodech, a.s. jsou anorganická, dvousložková, hlinitokřemičitá pojiva aktivovaná alkalickým aktivátorem. Vzniklý amorfní řetězec je chemicky a strukturálně srovnatelný s přírodní horninou (umělý kámen).

Geopolymery jsou vyráběny unikátním a prověřeným způsobem, splňujícím certifikaci ISO 9001:2000.

## **Využití a výhody**

Vynikající izolační materiál, využívá se na opravy poškozeného betonu, protipožární systémy, stavební chemie (tmely, krbové systémy), fixace těžkých kovů a radioaktivního odpadu, restaurování a imitace přírodních materiálů.

Mezi výhody tohoto materiálu patří vysoká rychlost tvrdnutí v řádech několika hodin, vysoká pevnost v tlaku, výborná adheze, s vhodně zvoleným poměrem ostřiv je možné použití až do 1200 °C. Dále má výborné mechanické vlastnosti, jako je chemická odolnost k agresivnímu prostředí (kyselé deště, bakterie), dále se při přípravě geopolymérů vznik emisí CO<sub>2</sub> snižuje o více než 50 %. [28]

## 5. Metodika měření

### 5.1 Simulace dlouhodobého působení hydrostatického tlaku

Simulací dlouhodobého působení hydrostatického tlaku je rozuměno zatížení testovaného materiálu vodou, kdy voda působí na testovaný materiál určitým tlakem závislým na výšce vodního sloupce. Vodní sloupec při experimentech je vysoký 1 metr a 1,5 metru. Pro stavební materiál je propustnost vody jedním z nejzávažnějších ukazatelů trvanlivosti a životnosti daného materiálu. Při tvorbě experimentu bylo snahou vytvořit takový experiment, který by simuloval dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu, a to především z hlediska zátěže povodněmi. Kdy povodeň na stavbu působí přibližně 4-5 dní, než začne voda pomalu ustupovat. Výsledné hodnoty testování budou zobrazovat propustnost vody testovaného materiálu, kterým bude nový materiál geopolymer, v kombinaci s nanovláknennou membránou.

#### 5.1.1 Zatížení hydrostatickým tlakem

O tomto tématu již pojednává Karolína Mayerová ve své práci, kterou bych ráda citovala.

*„Navrhovaná metodika měření odolnosti vůči pronikání vody je založena na dlouhodobém zatížení hydrostatickým tlakem. Tento tlak vzniká v kapalině a je způsoben její tíhou. Kapalina je v dané souřadné soustavě v klidu a působí na ni nenulové tíhové pole. Tíhovým polem se rozumí pole tíhové síly. Tíhová síla působí na tělesa na povrchu Země a je součtem gravitační a odstředivé síly, která vzniká otáčením Země kolem své osy. Tíhová síla  $F_g$  udílí všem tělesům na povrchu Země tíhové zrychlení  $g$ , tedy  $F_g = mg$ . Na kapalinu nacházející se v tíhovém poli Země působí tíhová síla, a proto je povrch volné kapaliny vždy kolmý k tíhové síle. Hydrostatický tlak vzniká v kapalině její tíhou  $G$ . Tíha, je veličina vyjadřující sílu působící na těleso v gravitačním poli na podložku nebo závěs. Je to statický projev působící tíhové síly, a proto  $G = F_g$ . Tíha tělesa vzniká na Zemi z gravitační síly, kterou je těleso Zemí přitahováno.*

*Hydrostatický tlak v kapalině působí na tělesa do ní ponořená, na stěny nádoby a na vlastní části kapaliny. Což znamená, že části položené výše tlačí svou vlastní tíhou na části kapaliny položené níže. Tento tlak působí všemi směry. To je způsobenou rozkladem sil mezi částicemi kapaliny do různých směrů.*

#### Výpočet hydrostatického tlaku

*Hydrostatický tlak  $p_h$  [Pa] je přímo úměrný hloubce v kapalině  $h$  [m] (tj. výšce kapalinového sloupce), na hustotě kapaliny  $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] a na tíhovém zrychlení  $g$  [m.s<sup>-2</sup>]. Pokud je hustota*



kapaliny  $\rho$ , pak bude hmotnost kapaliny v nádobě  $m = V\rho$ . A jestliže je nádoba o průřezu  $S$  a se svislými stěnami o výšce  $h$ , pak bude objem kapaliny v této nádobě  $V = Sh$ . Tíhovou sílu působící na dně nádoby lze pak zapsat následovně:

$$G = mg = Sh\rho g$$

Tlak u dna nádoby vychází ze vzorce pro tlak  $p = \frac{F_g}{S} = \frac{G}{S}$ . Hydrostatický tlak v hloubce  $h$  pod hladinou kapaliny o hustotě  $\rho$  má pak následující tvar:

$$P_h = h\rho g$$

[1]

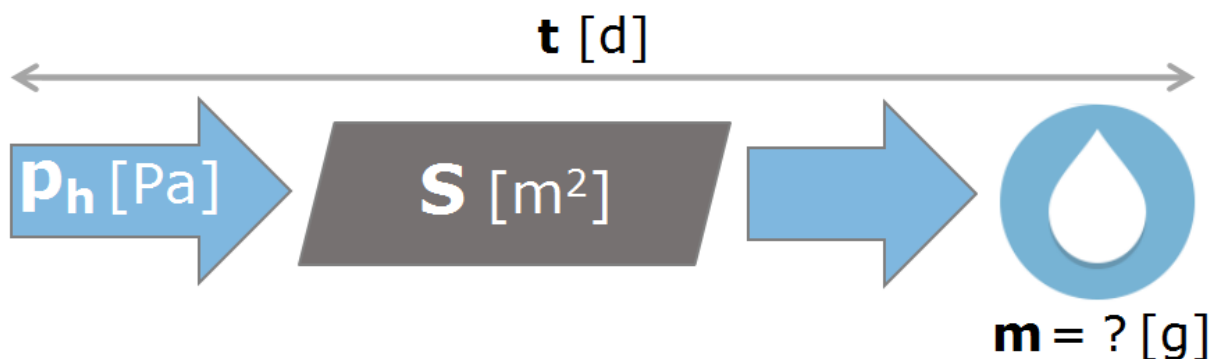
### 5.1.2 Princip zkoušky

Zde se jedná o určení proniknutého množství vody daným vzorkem materiálu o známé ploše za určitý čas při působení daného hydrostatického tlaku. Hydrostatický tlak, jak již bylo zmíněno, působil na vzorek výškou 1 m a 1,5 m. Hustota působící vody je  $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Hmotnostní přírůstek v gramech [g] přibližně odpovídal objemu proniklé vody v mililitrech [ml]. Testované vzorky při experimentu byly vystaveny zátěži hydrostatického tlaku dle následujícího vzorce:

$$P_h = h\rho g = 1 * 1000 * 9,81 = 9810\text{ Pa}$$

nebo

$$P_h = h\rho g = 1,5 * 1000 * 9,81 = 14715\text{ Pa}$$



Obrázek 21: Schéma metodiky měření

kde  $P_h [Pa]$  – působící hydrostatický tlak na plochu vzorku  
 $S [m^2]$  – plocha vzorku vystavená hydrostatickému tlaku  
 $m [g]$  – hmotnost proniklé vody  
 $t [d]$  – čas, působící na testování vzorku

Sledovaným parametrem v experimentech je hmotnost vody, která se shromažďuje v testovací skleničce. Byly zaznamenány přírůstky hmotnosti  $\Delta m$  zkušební sestavy, resp. sorbentu, který byl vně skleničky. Přírůstek hmotnosti je způsoben proniklou vodou skrz testovaný vzorek. Pro jednotlivý vzorek se změna hmotnosti vypočítala dle následujícího vztahu:

$$\Delta m = m_2 - m_1,$$

kde  $\Delta m$  – hmotnostní přírůstek [g]

$m_1$  – hmotnost sestavy před zátěží vodním sloupcem [g]

$m_2$  – hmotnost sestavy po zátěží vodním sloupcem [g]

Vzorky byly vystaveny působení tlaku při známé kruhové ploše  $S$  [cm<sup>2</sup>] a průměru  $d$  [cm].

Vzorec pro výpočet plochy je následující:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \text{ [cm}^2\text{]}$$

Získané hmotnostní přírůstky způsobené průnikem vody skrz testovaný materiál o dané ploše byly převedeny na plochu 1 m<sup>2</sup>. Pro výpočet propustnosti vody byl použit následující vzorec:

$$\text{Propustnost vody} = \frac{\Delta m[\text{kg}]}{S[\text{m}^2]} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

## 6. Experimenty

Experimentů se provedlo několik a s různými vzorky. Hlavními materiály pro testování byl nový materiál – geopolymer, následně byla testována nanovláknenná membrána, ať už samostatně nebo v kombinaci s geopolymerem. Také se testovaly vzorky geopolymery s příměsí hliníku, který způsobí v materiálu póry (o tom bude popsáno dále). Jednotlivé experimenty byly analyzovány z hlediska správnosti přípravy nebo chyby měření.

### 6.1 Příprava vzorků pro experiment

Vzorky jsou kruhového tvaru. Kruhové vzorky se zvolily z toho důvodu, protože kruhový tvar zajišťuje lepší těsnění, než např. u čtvercového tvaru, kde těsnění selhává v rohových místech. Dalším důvodem je vodní sloupec, který zatěžuje jednotlivé vzorky umístěné v HT trubkách válcového tvaru.

Snahou je tento experiment provádět kontinuálním způsobem na rozdíl od Karolíny Mayerové, která zvolila způsob diskontinuální. Důvodem je dosáhnout udržení stejného tlaku v HT trubkách.

#### 4 varianty vzorků:

- 1) Třívrstvá membrána II. generace – skládá se z netkané textilie a nanovláknenné membrány, kterou tvoří polyuretanová vlákna. Netkaná textilie zde plní nosnou funkci.
- 2) Geopolymer s membránou II. generace.
- 3) Samostatný geopolymer
- 4) Geopolymer s příměsí hliníku

### 6.1.1 Příprava geopolymu

Geopolymer tvoří 2 části, část A je BAUCIS L160 – jedná se o obchodní název vyráběný Českými lupkovými závody, a.s. Část B tvoří aktivátor, kterým je tekutina známá jako vodní sklo – jedná se o vodný roztok křemičitanu sodného ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Při přípravě pojivové směsi se obvykle používá 5 hmotnostních dílů části A a 4 hmotnostní díly části B (5:4). Při práci se zmíněnými složkami je důležité dodržovat bezpečnost a ochranu zdraví při práci. Zejména respirační rouška, ochranné brýle a rukavice. Z důvodu, že se jedná o prašný materiál, který může tvořit problémy dýchacím cestám a aktivátor obsahující nebezpečné látky, může působit agresivně na pokožku rukou.

Poté, co si odvážíme potřebné množství v daném poměru 5:4, obě složky smícháme. Nejprve pomalu promísíme (např. stěrkou), aby se prašný materiál spojil s vodním sklem, poté vložíme do míchacího přístroje. V přístroji směs mícháme nejprve pomaleji, až se začne tvořit pasta (gel), může se dále přidávat vyšší rychlost. Opět se s vyšší rychlostí zachází opatrněji, jelikož se u vysoké rychlosti otáček tvoří ve směsi bubliny, které jsou nežádoucí.

Takto připravenou směsí se naplnily formičky kruhového tvaru, které se nejprve vymazaly vazelínou pro snadné vyjmutí. Poté slouží jako finální vzorek, po následném vytvrzení geopolymu. Vzorky tvoří geopolymer, a nebo geopolymer s nanovláknennou membránou uvnitř geopolymu. Ukázka přípravy vzorků je zobrazena na obrázku 22 a 23. Naplněné formičky se následně zakryly fólií, aby se vlivem vzduchu na povrchu geopolymu nevytvořily praskliny. Pod fólií uvnitř geopolymu probíhá polykondenzační reakce, kdy se z vlhkého materiálu odpařuje vlhkost. Průměr kruhových formiček je 18,5 cm a 5,6 cm. Hustota geopolymu je v mokřém stavu cca 2 600  $\text{kg/m}^3$  a vytvrzeného, tedy suchého stavu 1 400  $\text{kg/m}^3$ .



Obrázek 22: Prvotní fáze přípravy vzorků



Obrázek 23: Formičky zalité vrstvou geopolymerního betonu

Vytvrzený geopolymer odolává teplotě 1 200°C, na rozdíl od betonu, který odolává maximální teplotě 600°C. V praxi se používá pro stavební účely, má lepší vlastnosti než beton (je pevnější a nehořlavý). Geopolymer se může použít na konstrukci příček, opravy dílen apod. Díky vysoké teplotě, které dokáže odolávat, se primárně využívá jako protipožární prvek.

Dalším využitím je forma postřiku, kdy se nastříká na dřevostavbu a ve spojení s membránou bude víceúčelový. Nanovláknenná membrána zajistí hydrofobní vlastnosti a propustnost pro vodní páry a geopolymer pevnost a nehořlavost.

## 6.2 Testování membrány II. generace (24 hodin)

Membrána II. generace se skládá ze tří vrstev: netkaná textilie-nanovláknenná membrána-netkaná textilie. Netkaná textilie zde plní nosnou funkci, jelikož nanovláknenná membrána je velmi tenká.

Testování bylo realizováno způsobem, že se do skleněné nádoby vložilo závaží, na hrdlo se upevnila membrána II. generace pomocí lněného provázku a následně se lněný provázek oblepil lepicí páskou pro dokonalé utěsnění. Takto se připravená soustava opatrně spustila do metrové HT trubky. Vzorek byl zde zatěžován vodním sloupcem 24 hodin. Testovaných vzorků s nanovláknennou membránou bylo vytvořeno šest. Výsledkem byl přírůstek hmotnosti v gramech, respektive v mililitrech vody a propustnost vody v  $\text{kg.m}^{-2}$ . V Tabulce 4 jsou zobrazeny výsledky.

Tabulka 4: Výsledky testování nanovláknenné membrány II. generace

Vzorek	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [ $\text{kg.m}^{-2}$ ]
1	579,74	588,21	8,47	3,00
2	580,16	587,74	7,58	2,68
3	580,83	588,13	7,30	2,58
4	569,96	581,74	11,78	4,17
5	564,80	576,78	11,98	4,24
6	576,15	589,25	13,10	4,64
průměr			10,04	3,55
směrodatná odchylka			2,32	
95% IS - spodní mez			7,60	
95% IS - horní mez			12,47	

Po 24 hodinovém působení vodním sloupcem prosáklo nanovláknennou membránou II. generace průměrně  $3,55 \text{ kg.m}^{-2}$  vody.

### 6.2.1 Měření membrány z hlediska upevnění

Zde se vyzkoušela jiná možnost upevnění membrány do skleničky. Měření zde probíhalo 24 hodin. Vytvořily se dva kulaté vzorky o průměru 5,9 cm (o 1 milimetr menší průměr membrány než má sklenička) a dva čtvercové vzorky, které se použily již v předchozích experimentech. Zde se zkoumalo upevnění různým způsobem, zda má vliv na výsledné hodnoty měření. Kulaté vzorky se upevnil silikonem, kde se vzorek membrány vložil do skleničky a po obvodu se upevnil silikonem. Výsledné hodnoty lze vidět v tabulce 5, kde testování upevnění membrány

pomocí silikonu vyšlo podobně jako upevnění pomocí lepicí pásky. Čtvercový vzorek membrány byl umístěn na skleničku a upevněn okolo hrdla skleničky pomocí lněného provázku. Následně se vše upevnilo pomocí voděodolné lepicí pásky, aby se zabránilo proniknutí vody mimo membránu.

Tabulka 5: Testování různého upevnění nanovlákněné membrány na skleničku

Vzorek	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
Kulatá membrána	565,47	576,60	11,13	3,94
Kulatá membrána	583,50	598,72	15,22	5,39
Průměr kulaté membrány			13,18	4,66
Čtvercová membrána	585,04	596,30	11,26	3,98
Čtvercová membrána	585,22	598,44	13,22	4,68
Průměr čtvercové membrány			12,24	4,33

Geopolymer s membránou	573,87	573,99	0,12	0,06
Geopolymer bez membrány	567,85	568,00	0,15	0,06

Na obrázku 24 je zobrazen způsob upevnění, který byl popsán v přechozím odstavci. Dva vzorky vlevo jsou upevněny pomocí voděodolné lepicí pásky, další dva vzorky zprava jsou upevněny pomocí silikonu vně skleničky. Výsledné hodnoty ukázaly, že oba způsoby upevnění vykazují podobné hodnoty propustnosti vody, respektive zde není výrazný rozdíl. Propustnost geopolymeru s membránou a bez membrány vykazuje téměř totožné hodnoty. Výsledky jsou podobné jako v případě měření v odstavci 6.4.



Obrázek 24: Názorná ukázka upevnění membrány

### 6.2.2 Dlouhodobější měření membrány (4 dny)

V tomto experimentu proběhlo testování nanovlákněné membrány II. generace z dlouhodobějšího hlediska zátěže vodním sloupcem. Působení hydrostatického tlaku na vzorek nanovlákněné membrány probíhalo 4 dny. Způsob upevnění membrány na skleničku byl

pomocí lepicí pásky, jak již bylo popsáno v předchozí kapitole **6.2.1**. Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Měření nanovlákněné membrány II. generace

Vzorek	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [kg.m <sup>-2</sup> ]
1	569,25	587,84	18,59	6,58
2	462,28	481,64	19,36	6,85
3	454,53	478,47	23,94	8,47
4	460,99	482,41	21,42	7,58
5	568,18	580,51	12,33	4,36
6	578,53	581,48	<b>2,95</b>	<b>1,04</b>
7	565,39	577,75	12,36	4,37
8	582,67	596,72	14,05	4,97
Průměr			17,44	6,17

1	597,91	621,73	23,82	8,43
2	598,50	620,15	21,65	7,66
Průměr			22,74	8,04

Po 4 denním působení vodním sloupcem prosáklo nanovlákněnou membránou II. generace průměrně 6,17 kg.m<sup>-2</sup> vody. Z tabulky lze vyčíst, že u měření vzorku 6 nastala chyba. Tato hodnota je výrazně odlehlá od ostatních, proto ji lze považovat za chybu měření. Vzorky 1 a 2 ve spodní části tabulky jsou výsledky měření, kdy vzorky nanovlákněné membrány byly ponořeny do 1,5 m vysoké trubky. Tyto hodnoty vykazují vyšší přírůstek hmotnosti, jelikož zde působil vyšší tlak na testované vzorky. Průměrná propustnost vody zde byla 8,04 kg.m<sup>-2</sup>. V horní části tabulky u vzorků 1-8 byl tlak nižší, respektive vzorky byly ponořeny do 1 m vysoké trubky.

### 6.3 Testování geopolymery

Další měření proběhlo se vzorky geopolymery. Testovalo se 5 vzorků, kde byl použit samostatný geopolymer a geopolymer s membránou uvnitř. Jako šestý vzorek se otestoval mikrotenový sáček, který je nepropustný vůči vodě (Obrázek 27). Mikrotenový sáček je velmi tenká plastová polyetylenová fólie určená především k balení potravin. Z chemického hlediska je mikroten vysoce hustotní polyetylen (HDPE – z anglického High-density polyethylene). V tabulce 7 je zobrazení výsledků hmotnostních přírůstků a propustnosti vody vztažené na kg.m<sup>-2</sup>.



Tabulka 7: Výsledky testování varianty s geopolymérem

Geopolymer	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
S membránou	573,95	574,50	0,55	0,22
S membránou	582,48	585,77	<b>3,29</b>	<b>1,29</b>
S membránou	583,22	583,41	0,19	0,07
Průměr			0,37	0,15

Bez membrány	564,98	570,74	5,76	2,26
Bez membrány	567,87	568,10	0,23	0,09
Igelitový sáček	584,53	584,80	0,27	0,11

Tento experiment byl vystaven hydrostatickému tlaku po dobu 4 hodin. Dva vzorky s membránou nepropustily žádnou vodu. Na obrázku 25 jsou vidět všechny tři vzorky geopolyméru s membránou, u dvou vzorků lze vidět, že voda byla zachycena nad membránou a u třetího vzorku nastala chyba, kdy voda protekla skrz. Důvodem bylo špatné utěsnění. A u samotného geopolyméru bez membrány (Obrázek 26) protekla voda jedním vzorkem a zde byla také chyba v utěsnění vzorku ve skleničce. Vzorky byly utěsněny pomocí silikonu, který se aplikoval tím způsobem, že byl vzorek umístěn do skleničky, ve které byla aranžerská hmota. Na aranžerskou hmotu se umístil vzorek geopolyméru a následně se z vrchu po obvodu zasilikonoval. Vrstva silikonu nebyla dostatečně silná, tudíž voda prosákla.



Obrázek 25: Geopolymer s membránou



Obrázek 26: Samostatný geopolymer



Obrázek 27: Vzorek s mikrotenovým sáčkem

#### 6.4 Další série měření

V tabulce 8 jsou zobrazeny výsledné hodnoty další série, a to testování geopolymeru i nanovlákněné membrány, která byla vystavena hydrostatickému tlaku po dobu 24 hodin.

Tabulka 8: Výsledky testování geopolymeru i samostatné membrány

Vzorek	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
Geopolymer s membránou	573,87	573,99	0,12	0,07
Geopolymer s membránou	583,17	583,27	0,10	0,05
Geopolymer s membránou	564,94	565,00	0,06	0,03
Průměr geopolymeru s membránou			0,09	0,05
Geopolymer bez membrány	567,85	568,12	0,27	0,11

Samostatná membrána	582,45	589,65	7,20	2,55
Samostatná membrána	583,79	591,41	7,62	2,70
Průměr samostatné membrány			7,41	2,62

Geopolymer s membránou nepustil žádnou vodu, podobně na tom byl také geopolymer bez membrány. Geopolymer s membránou měl průměrnou propustnost vody  $0,05 \text{ kg.m}^{-2}$  a geopolymer bez membrány  $0,11 \text{ kg.m}^{-2}$ . Vzorky samostatné membrány měly průměrnou propustnost vody  $2,62 \text{ kg.m}^{-2}$ . Vzorky po zátěži vodním sloupcem lze vidět na obrázku 28, kdy vzorek s membránou uvnitř udržel vlhkost nad nanovláknennou membránou. Vzorky geopolymeru byly utěsněny ve skleničce pomocí silikonové vrstvy takovým způsobem, že se silikon aplikoval dovnitř skleničky, aby se zamezilo chybě v předešlém případě (Obrázek 29).



Obrázek 28: Geopolymer po zátěži vodním sloupcem

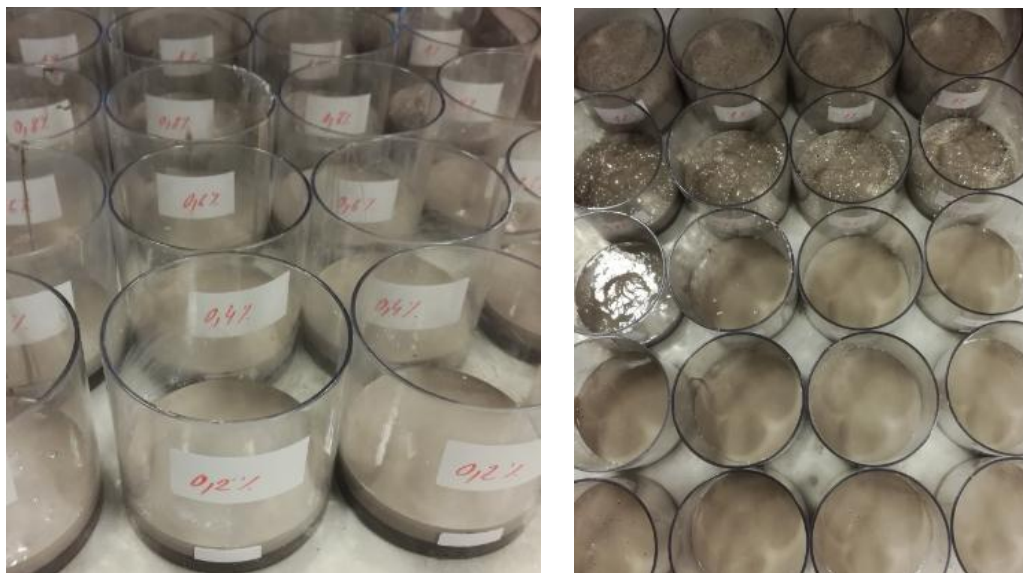


Obrázek 29: Příprava vzorku se silikonem (vlevo) a připravený vzorek pro experiment (vpravo)

## 6.5 Experiment geopolymery s přidavkem hliníku

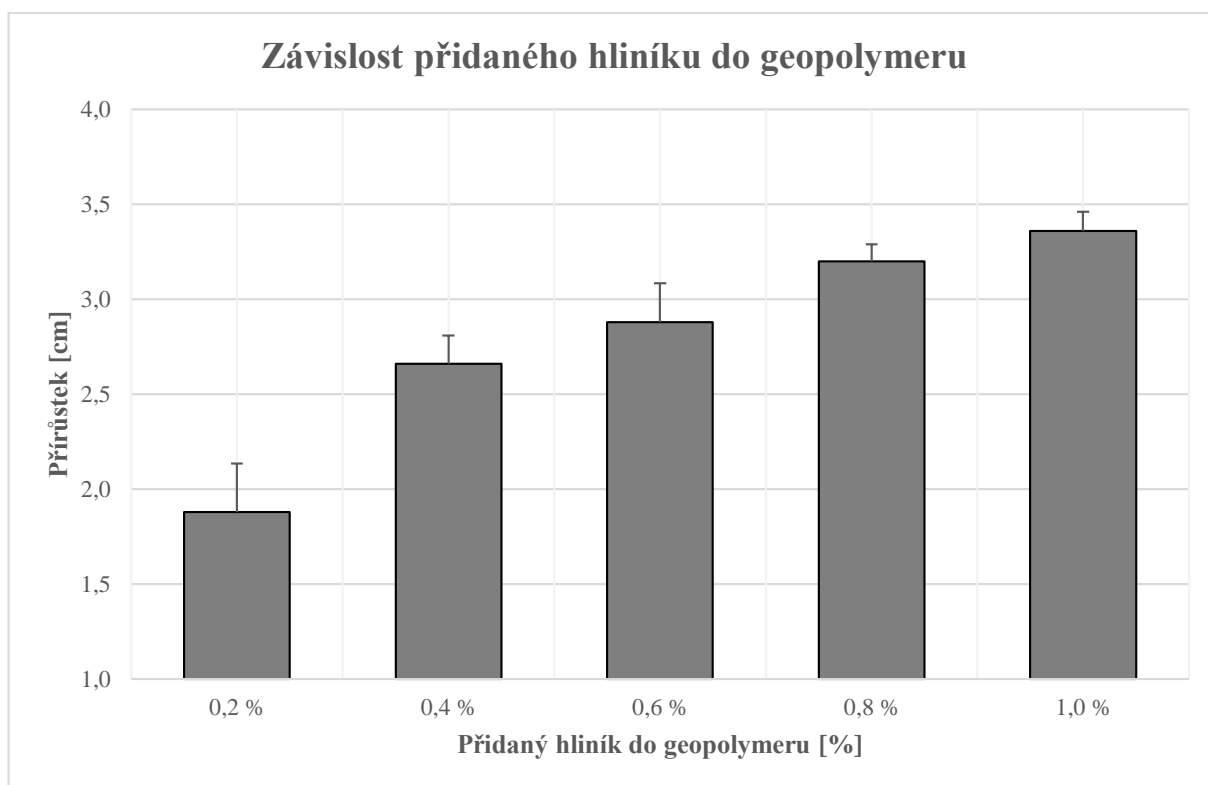
Po přidání hliníku do směsi geopolymery se uvnitř směsi tvoří póry. Při přechodu z mokrého stavu do suchého se ve směsi tvoří póry, a to způsobuje růst hmoty do určité výšky. Abychom znali přesnou výšku při určitém procentu hliníku ve směsi geopolymery, byl proveden experiment. Tento experiment bude přínosem při další realizaci vzorků, kdy bude požadována určitá výška.

V tomto experimentu se testovala směs geopolymery s různým procentem přidavku hliníku. Vytvořilo se 5 směsí s různým procentem přidavku hliníku, a to s 0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, 0,8 % a 1 %. Pro přípravu experimentu se použilo 5 plastových skleniček pro každou směs, dohromady tedy bylo pro experiment použito 25 skleniček s různým procentem hliníku ve směsi geopolymery. Každá plastová sklenička se naplnila směsí do výšky 1 cm. Výška 1 cm byla na skleničce označena lepicím papírkem, který sloužil jako značka, pro přesnou hladinu směsi. Již po pár minutách se uvnitř skleniček začala tvořit reakce, kdy směs začínala pomalu růst (Obrázek 30).



Obrázek 30: Označení skleniček ve výšce 1 cm (vlevo) a probíhající reakce uvnitř směsi (vpravo)

Výsledné nárůsty od původního 1 cm lze vidět na obrázku 31, kde je grafické znázornění. Předpokládalo se, že s vyšším procentem hliníku ve směsi bude nárůst celkového vzorku vyšší, což se potvrdilo.



Obrázek 31: Grafické znázornění závislosti přidaného hliníku do geopolymery

Grafické znázornění je pomocí sloupců při určitém procentu přidaného hliníku do směsi geopolymery. Data v grafu jsou použita tak, že se u vzorku změřila celková jeho výška a odečetl se původní 1 cm (obrázek 32). Respektive v grafu jsou použita pouze data přírůstků.



Obrázek 32: Schéma geopolymery



## 6.6 Měření geopolymery s 1 % hliníku

Další experiment proběhl s geopolymery, který obsahoval 1 % hliníku. Na obrázku 32 lze



vidět připravené vzorky na experiment. Takto připravené vzorky se nejprve vyjmuly z formiček, do kterých se odlily. Následně se po stranách obrousily na požadovanou velikost, aby měly v průměru 5 cm. Dále ještě bylo potřeba vzorky po stranách zasilikonovat, jelikož je to pórovitý materiál tak, aby nedošlo k chybě tím, že by voda protekla po stranách a ne z vrchní části.

Na levé straně jsou tři vzorky geopolymery s nanovláknennou membránou a napravo tři vzorky geopolymery bez membrány.

Obrázek 33: Vzorky geopolymery s 1 % hliníku

Tabulka 9: Výsledky měření geopolymery s 1 % hliníku s membránou

S membránou	m <sub>2</sub> [g]	m <sub>1</sub> [g]	Δm [g]	Propustnost vody [kg.m <sup>-2</sup> ]
1	580,78	581,00	0,22	0,11
2	573,95	578,97	5,02	2,56
3	582,96	588,90	5,94	3,03
4	580,59	584,14	3,55	1,81
5	567,19	567,19	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
6	584,18	585,28	1,10	0,56
Průměr			3,17	1,61

V tabulce 9 jsou zobrazeny výsledné hodnoty testování série geopolymery s 1% obsahem hliníku s membránou, která byla vystavena hydrostatickému tlaku po dobu 24 hodin. Průměrná propustnost vody zde byla 1,61 kg.m<sup>-2</sup>, což přibližně odpovídá 1,5 litru na metr čtvereční. U 5. vzorku došlo k chybě, kdy vzorek nepropustil žádnou vodu.

Tabulka 10: Výsledky měření geopolymery s 1 % hliníku bez membrány

Bez membrány	m <sub>2</sub> [g]	m <sub>1</sub> [g]	Δm [g]	Propustnost vody [kg.m <sup>-2</sup> ]
1	454,38	459,22	4,84	2,47
2	567,32	605,86	<b>38,54</b>	<b>19,63</b>
3	584,12	590,66	6,54	3,33
4	454,60	460,35	5,75	2,93
5	574,73	575,65	0,92	0,47
6	582,81	584,20	1,39	0,71
Průměr			3,89	1,98

V tabulce 10 jsou zobrazeny výsledné hodnoty testování geopolymery s 1% obsahem hliníku bez membrány. Vzorky zde byly vystaveny zátěži vodním sloupcem 24 hodin. Průměrná propustnost vody zde byla 1,98 kg.m<sup>-2</sup>, což přibližně odpovídá 2 litrům vody na metr čtvereční. Zde také došlo k chybě, kdy u druhého vzorku došlo k výrazné propustnosti vody než u jiných. Zde byla příčinou špatné zasilikonování vzorku po stranách, kdy voda protekla skrz boční stranu.

## 6.7 Měření geopolymery s 0,5 % hliníku

Další měření proběhlo se vzorky s nižším obsahem hliníku ve směsi geopolymery – 0,5 %. Na



obrázku 33 jsou zobrazeny vzorky, které jsou ve formičkách připravené k vyjmutí a následným přípravám pro testování (obroušení a zasilikonování po stranách). Z obrázku lze vidět, že nižší procento hliníku způsobuje i menší velikost pórů uvnitř materiálu. Opět jsou zde 3 vzorky s membránou a 3 bez membrány.

Výsledky měření tohoto materiálu jsou v tabulkách 11 a 12.

Obrázek 34: Vzorky geopolymery s 0,5 % hliníku

Tabulka 11: Výsledky měření geopolymery s 0,5 % hliníku s membránou

S membránou	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
1	464,60	464,98	0,38	0,19
2	457,94	457,94	0,00	0,00
3	564,55	565,11	0,56	0,29
Průměr			0,31	0,16

V tabulce 11 jsou zobrazeny výsledné hodnoty testování geopolymery s 0,5% obsahem hliníku s membránou. Vzorky zde byly vystaveny zátěži vodním sloupcem 24 hodin. Průměrná propustnost vody zde byla  $0,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . U druhého vzorku nedošlo k žádné propustnosti vody.

Tabulka 12: Výsledky měření geopolymery s 0,5 % hliníku bez membrány

Bez membrány	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
1	453,57	453,57	0,00	0,00
2	461,60	465,23	3,63	1,85

V tabulce 12 jsou zobrazeny výsledné hodnoty testování geopolymery s 0,5% obsahem hliníku bez membrány. Vzorky zde byly také vystaveny zátěži vodním sloupcem 24 hodin. Zde jsou výsledky pouze ze dvou vzorků, kde jeden vzorek nepropustil žádnou vodu, což zde lze chápat za chybu, jelikož vzorek neobsahoval membránu a druhý vzorek propustil  $1,85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ .

## 6.8 Nová metoda vzorků geopolymery

V těchto experimentech byly využity pro výrobu vzorků jiné formičky. Hlavním důvodem pro změnu forem byl průměr požadovaného finálního vzorku. Formičky jsou plastové a mají průměr 5 cm. Tímto způsobem se finální vzorky nemusí obrušovat a zachovávají si svůj tvar. Při nové metodě jsme využili toho, že formičky mají dno. Na dno formy se umístila nanovlákněná membrána a na ní se aplikovala vrstva geopolymery. Do směsi geopolymery se opět přidával hliník, a to 1 %. Na obrázku 34 lze vidět formičky s připravenou směsí, a to v tekutém stavu a po vytvrzení.





Obrázek 35: Geopolymer v tekutém stavu (vlevo) a geopolymer po vytvrzení (vpravo)

### Nevhodné vzorky pro měření

Vzorky na obrázku 35 jsou nevhodné pro měření z hlediska jejich tvaru. Každý vzorek vypadá úplně jinak, to je způsobené reakcí při vytvrzení geopolymery. Vzorky jsou také moc velké pro aplikaci do skleněných nádob, které se používají k měření.



Obrázek 36: Vzorky geopolymery s 1 % hliníku a nanovláknennou membránou navrchu

V přechodím případě byly vzorky příliš vysoké a v následujícím případě naopak příliš nízké. Na obrázku 46 lze vidět jejich povahu. To bylo způsobené tím, že do formičky byla vložena membrána a na ní pouze malé množství směsi geopolymery s 1 % hliníku. Zde byla také chyba, že průměr membrány se zvolil menší než byl průměr formičky. Vrstva geopolymery se dostala i pod membránu, což způsobilo narušení membrány.



Obrázek 37: Vzorky geopolymery s 1 % hliníku a nanovláknennou membránou navrchu

## 7. Výsledky a diskuze

### 7.1 Testování nanovláknenné membrány

Hlavním výsledkem experimentální části je propustnost vody v  $\text{kg.m}^{-2}$ , respektive kolik litrů vody proteče testovaným materiálem na metr čtvereční. Testovanými materiály byly nanovláknenná membrána, geopolymer a propojení geopolymeru s nanovláknennou membránou a různou příměsí hliníku. Hliník v geopolymeru způsobuje póry a materiál se tak stává více nasákavým.

Nejprve byla testována nanovláknenná membrána II. generace, a to při 24 hodinové zátěži vodním sloupcem v 1 m vysokých HT trubkách. Po 24 hodinovém působení vodního sloupce byla průměrná propustnost vody  $3,55 \text{ kg.m}^{-2}$ . Následně byly provedeny ještě dvě měření a průměrná propustnost vody byla  $2,62 \text{ kg.m}^{-2}$ . Celková průměrná propustnost vody je tedy  $3,09 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Při 24 hodinové zátěži se testovaly různé způsoby upevnění membrány. Vytvořily se kulaté vzorky o průměru 5,9 cm (o 1 milimetr menší průměr membrány než má sklenička) a čtvercové vzorky. Kulaté vzorky byly vloženy do skleněné nádoby a upevněny silikonem po obvodu. Čtvercový vzorek membrány byl umístěn na skleničku a upevněn okolo hrdla skleničky pomocí lněného provázku. Následně se vše upevnilo pomocí voděodolné lepicí pásky, aby se zabránilo proniknutí vody mimo membránu. Výsledné hodnoty ukázaly, že oba způsoby upevnění vykazují podobné hodnoty propustnosti vody. Můžeme konstatovat, že způsob upevnění zde nemá významný vliv na samotné měření.

Další měření nanovláknenné membrány byly podrobeny 4 denní zátěži vodním sloupcem. Zde byla průměrná propustnost vody  $6,17 \text{ kg.m}^{-2}$ . V tomto experimentu se vyskytla u jednoho měření chyba. Výsledná hodnota byla výrazně odlehla od ostatních. Dvě měření byly vystaveny vodnímu sloupci v 1,5 m vysokých HT trubkách, kdy byl tlak vodního sloupce vyšší. Průměrná propustnost vody byla  $8,04 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Časové rozmezí měření bylo zvoleno s ohledem na vliv působení povodně na stavbu. 24 hodin, jako prvotní působení povodně na zatopenou stavbu. 4 dny – po tomto časovém úseku povodeň postupně ustupuje a stavba pomalu vysychá. Výsledek po 4 dnech při zátěži 1m vysokým vodním sloupcem je dvojnásobný. To je způsobené tím, že průtok vody testovanou membránou je nelineární. Množství proteklé vody roste a mírně se ustaluje na určité hodnotě. Tento jev je způsoben fyzikálními jevy a strukturou nanovláknenné membrány, kdy netkaná textilie

nabobtná, tím se ucpou póry nebo se výrazně zmenší a při dalších dnech zátěže vodním sloupcem už nanovláknenná membrána funguje jako „filtr“ – z velkých pórů jsou menší.

#### **7.1.1 Závady vzniklé při měření:**

- Poškození membrány – poškozená membrána nemůže plnit svoji funkci, když jsou na jejím povrchu menší trhlinky, mastný povrch nebo jiné nečistoty
- Způsob upevnění – nanovláknenná membrána se na skleněnou nádobu upevňovala pomocí lněného provázku, který se omotal okolo hrdla skleněné nádoby, na kterém byla umístěna nanovláknenná membrána. Zjištěná chyba v tomto případě je, že se provázek omotal pouze jednou, vhodným řešením této chyby je použít lněný provázek tak, aby se okolo hrdla omotal minimálně pětkrát, tím se dosáhne lepší izolace.
- Aranžérská hmota – při experimentu se stala chyba i s aranžérskou hmotou. Aranžérská hmota byla aplikovaná do skleněné nádoby takovým způsobem, že byla uvnitř natěsněna a voda proteklá membránou se nemohla vsáknout do hmoty a zůstala na povrchu.

### **7.2 Testování geopolymery**

Dále byly provedeny experimenty s geopolymery, kdy byl měřen samotný geopolymery a geopolymery ve spojení s membránou z hlediska propustnosti vody. Dále bylo předmětem zkoumání přidání hliníku do směsi geopolymery, a to s různým procentem. Přidání hliníku způsobuje v geopolymery póry a čím vyšší procento hliníku, tím větší jsou uvnitř geopolymery póry a velikost vzorku. Dále jsou popsány chyby způsobené při výrobě geopolymery.

Měření geopolymery probíhalo způsobem, že jednotlivé vzorky geopolymery byly vně skleněné nádoby upevněny pomocí silikonu. Před upevněním vzorku do skleněné nádoby se vzorky nejprve obrousily na průměr  $d = 5 \text{ cm}$ . Prvotní testování probíhalo při 4 hodinové zátěži vodním sloupcem. Byly testovány 3 vzorky geopolymery s membránou (membrána umístěna uprostřed směsi) a 2 vzorky geopolymery samotného bez membrány. Při tomto měření nastalo několik chyb, a to hlavně v utěsnění vzorků ve skleněné nádobě. U dvou vzorků geopolymery s membránou byla vlhkost zachycena nad membránou, což se považuje za příznivý výsledek měření. U jednoho vzorku byla vlhkost v celém vzorku, kdy se voda dostala i pod membránu. Tato chyba byla způsobena upevněním – vzorek byl zasílikonován pouze ve vrchní části svého obvodu a voda se dostala skrz silikonovou vrstvu, tudíž geopolymery pod membránou byl vlhký. Tento výsledek se považuje za neplatný, protože nesplnil funkci působení vodního sloupce na plochu zatěžovaného vzorku, jelikož se dostal mimo tuto oblast. U samotného geopolymery

bez membrány voda protekla jedním vzorkem a zde byla také chyba v utěsnění vzorku ve skleničce.

Následně proběhly měření při 24 hodinové zátěži vodním sloupcem. Rozdíl zde byl v aplikaci silikonu. Silikon se aplikoval dovnitř skleněné nádoby po celém obvodu, ale takovým způsobem, aby silikon obklopil celkovou výšku vzorku geopolymeru. Tímto se předešlo chybě v předchozím případě. Geopolymer s membránou nepropustil žádnou vodu (vlhkost byla opět zadržena nad nanovláknennou membránou), podobně na tom byl také geopolymer bez membrány. Geopolymer s membránou měl průměrnou propustnost vody  $0,05 \text{ kg.m}^{-2}$  a geopolymer bez membrány  $0,11 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Dále se experimentovalo s přidáním hliníku do směsi geopolymeru, který tvoří uvnitř materiálu póry. Při výrobě byla nanovláknenná membrána umístěna do vrchní části materiálu oproti předešlému způsobu, kdy byla nanovláknenná membrána uprostřed materiálu. Tím, že je materiál pórovitý tak to způsobuje vyšší nasákavost. Vytvořilo se 5 směsí geopolymeru s různým procentem hliníku, a to 0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, 0,8 % a 1 %. Takto připravené směsi nalily do plastovým nádob válcového tvaru, v každé nádobě byl 1 cm směsi a sledoval se nárůst směsi od původní výšky. Výsledné hodnoty byly zaznamenány graficky. Předpokládalo se, že čím vyšší procento hliníku se do směsi přidá, tím vyšší bude jeho nárůst od původní výšky 1 cm. Tento předpoklad byl potvrzen. Jednotlivé hodnoty byly proloženy přímkou lineární regrese.

Měření geopolymeru s příměsí 1 % hliníku probíhalo obdobě jako u geopolymeru bez hliníku. Jelikož tento materiál má pórovitý charakter, tak stěny vzorku se ještě před samotným měření zasilikonovaly, aby nedošlo k chybě, že by voda protekla skrz póry. Měření byly vystaveny 24 hodinové zátěži vodním sloupcem. Výsledkem měření geopolymeru s membránou byla průměrná propustnost vody  $1,61 \text{ kg.m}^{-2}$ , což přibližně odpovídá 1,5 litru na metr čtvereční. U jednoho vzorku nastala chyba, kdy vzorek nepropustil žádnou vodu. Tato chyba je způsobená ucpáním pórů silikonem. U vzorků geopolymeru bez mebrány byla průměrná propustnost vody  $1,98 \text{ kg.m}^{-2}$ , což přibližně odpovídá 2 litrům vody na metr čtvereční. I zde nastala chyba měření, kdy u jednoho vzorku došlo k výrazné propustnosti vody než u jiných. Zde bylo příčinou špatné zasilikonování vzorku po stranách, kdy voda protekla skrz boční stranu.

U měření geopolymeru s příměsí 0,5 % hliníku byl postup přípravy stejný jako v předchozím případě. Měření zde byly vystaveny také 24 hodinové zátěži vodním sloupcem. Výsledkem měření geopolymeru s membránou byla průměrná propustnost vody  $0,16 \text{ kg.m}^{-2}$ . U jednoho

vzorku nedošlo k žádné propustnosti vody, příčinou bylo opět ucpání pórů. U měření geopolymeru bez membrány byly propustnost vody  $1,85 \text{ kg.m}^{-2}$  (výsledek z měření jednoho vzorku).

Při dalších experimentech byly využity pro výrobu vzorků jiné formičky. Hlavním důvodem pro změnu forem byl průměr požadovaného finálního vzorku. Formičky jsou plastové a mají průměr 5 cm. Nanovlákná membrána při výrobě byla umístěna na dno formičky a na ní se aplikovala vrstva geopolymeru. Do směsi geopolymeru se opět přidával hliník, a to 1 %.

### **7.2.1 Závady vzniklé při měření:**

- Silikon – se silikonem se naskytlo hned několik problémů.
  - Nejprve, když se při testování klasického geopolymeru s membránou umístil do vrchní části, kdy voda protekla skrz membránu. Voda se dostala přes silikon a dostala se pod membránu, kdy byl vzorek nasáklý a propustil tak více vody.
  - Dalším problémem bylo, když se použilo málo silikonu a nedotýkal se vzorku obdobně v předchozí situaci.
  - Další závada nastala, když se silikon aplikoval dovnitř skleněné nádoby – po umístění vzorku se silikon následně dostal pod vzorek a zabránil tak průtoku kapaliny vzorkem.
- Velikost vzorku – hlavním problém zde bylo, že nebylo možné dosáhnout přesného tvaru vzorku, tak aby všechny vzorky byly stejné a měli tak stejnou vypovídací hodnotu při měření.
  - Vzorek stejně velký jako skleněná nádoba – nutnost vzorek obrousit, tím vznikly v geopolymeru broušením větší póry (chyba se silikonem).
  - Menší průměr vzorku – problém při aplikaci do skleněné nádoby, bylo nutné použít více silikonu a následně čekat na zaschnutí a následné zasilikonování ze shora.
  - Na závěr bylo dosaženo zjištění, že do skleněné nádoby ( $\varnothing 6 \text{ cm}$ ) je nejvhodnější vyrobit vzorek o  $\varnothing 5,3 \text{ cm}$ .

### **7.3 Předmět dalšího výzkumu**

Při dalším výzkumu bych navrhovala pokračovat v této práci. Vzorky aplikovat na větší měřicí sestavě pro větší průměry, tímto se již zabývá kolega Miroslav Herclík a Miroslav Frydrych. Analyzování nového materiálu, a to geopolymeru, bylo časově náročné na výrobu a testování.

Dalším předmětem výzkumu bych volila aplikaci geopolymery na dřevotřískovou desku a vytvořit tak sendvič, který by simuloval zmenšený model stavby, respektive dřevostavby. Sendvič bych navrhovala ve spojení dřevotřískové desky s geopolymery a nanovláknennou membránou. Tento zmenšený model by simuloval dřevostavbu, která by byla dále testována.

Dalším předmětem výzkumu by mohla být aplikace membrány na perlinku či na jiný komponent, např. čedičovou mřížku. Geopolymer navrhuji využít ve spojení s pískem a membránou.

## 8. Metodický pokyn pro výrobu stavebního kompozitu (geopolymeru)

Geopolymer tvoří 2 části:

Část A – BAUCIS L160, jedná se o obchodní název vyráběný Českými lupkovými závody, a.s.

Část B – aktivátor, kterým je tekutina známá jako vodní sklo – jedná se o vodný roztok křemičitanu sodného ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

Při přípravě pojivové směsi se obvykle používá 5 hmotnostních dílů části A a 4 hmotnostní díly části B, tedy v poměru 5:4. Při práci se zmíněnými složkami je důležité dodržovat bezpečnost a ochranu zdraví při práci. Zejména respirační roušku, ochranné brýle a rukavice. Z důvodu, že se jedná o prašný materiál, který může tvořit problémy dýchacím cestám a aktivátor obsahující nebezpečné látky, může působit agresivně na pokožku rukou.

Poté, co si odvážíme potřebné množství v daném poměru 5:4, obě složky smícháme (např. pomocí kuchyňského robotu – obrázek 38). Nejprve pomalu promísíme (např. stěrkou), aby se prašný materiál spojil s vodním sklem, poté vložíme do míchacího přístroje. V přístroji směs mícháme nejprve pomaleji, až se začne tvořit pasta (gel), může se dále přidávat vyšší rychlost. Opět se s vyšší rychlostí zachází opatrněji, jelikož se u vysoké rychlosti otáček tvoří ve směsi bubliny, které jsou nežádoucí. Když je směs dokonale promíchána (cca po 3 minutách), můžeme s ní zacházet dle potřeby.

Takto připravenou směsí můžeme naplnit formičky takového tvaru, který je žádoucí pro výsledné vzorky geopolymeru (obrázek 39). Formičky mohou být z plastu, ale nejprve se musí vymazat vazelinou pro snadné vyjmutí. Poté slouží jako finální vzorek, po následném vytvrzení geopolymeru.

Naplněné formičky se následně zakryjí fólií, aby se vlivem vzduchu na povrchu geopolymeru nevytvořily praskliny (obrázek 40). Pod fólií uvnitř geopolymeru probíhá polykondenzační reakce, kdy se z vlhkého materiálu odpařuje vlhkost. Hustota geopolymeru je v mokrému stavu cca  $2\,600\text{ kg/m}^3$  a vytvrzeného, tedy suchého stavu  $1\,400\text{ kg/m}^3$ .

Vytvrzený geopolymer odolává teplotě  $1\,200^\circ\text{C}$ , na rozdíl od betonu, který odolává maximální teplotě  $600^\circ\text{C}$ . V praxi se používá pro stavební účely, má lepší vlastnosti než beton (je pevnější a nehořlavý). Geopolymer se může použít na konstrukci příček, opravy dílen apod. Díky vysoké



teplotě, které dokáže odolávat, se primárně využívá jako protipožární prvek. Dalším využitím je forma postřiku, kdy se nastříká na dřevostavbu a zajistí stavbě nehořlavost.

Vytvrzení geopolymery probíhá cca 1 týden při standardních podmínkách (teplota 25°C a vlhkost vzduchu 55 – 60 %), kdy se může dále použít. Pokud chceme mít materiál dříve „suchý“, můžeme použít sušičku, ale musí se zde postupovat opatrně a vysoušet při nižší teplotě. Vysoká teplota může narušit strukturu geopolymery (popraskání).



Obrázek 38: Příprava směsi



Obrázek 39: Formičky naplněné směsí geopolymery

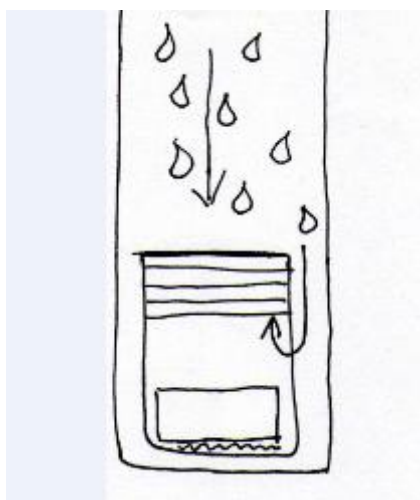


Obrázek 40: Vzorky zakryté fólií

### **Popis chyb při přípravě vzorků**

Zjištěné závady byly odhaleny po zátěži 1 m vysokým vodním sloupcem působícím na daný testovaný materiál. Mezi uvedené závady jsou zařazeny: mikrotenový sáček, geopolymery, nanovláknenná membrána a kombinace geopolymery a nanovláknenné membrány.

**Mikrotenový sáček** – zde nastala chyba ve formě upevnění mikrotenového sáčku na skleněnou



nádoby. Mikrotenový sáček byl upevněn pomocí lepicí pásky, která dokázala propustit vodu. U mikrotenového sáčku víme, že je pro vodu nepropustný, proto se zkoušelo jeho upevnění. V tomto případě lepicí páska propustila průměrně 0,7 l vody.

Obrázek 41: Schéma závady – mikrotenový sáček

### Nanovláknenná membrána

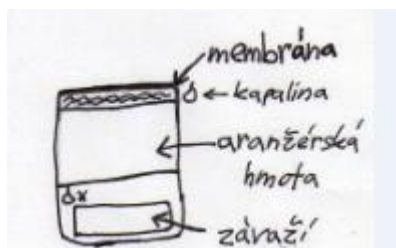
Obvázání provázkem, protékání vody páskou – zjištěnou závadou ve formě upevnění byl použitý lněný provázek. Upevnění se realizovalo, že se z provázku udělala smyčka a utáhla se pod hrdlem skleněné nádoby a poté se přečnickující membrána odstranila a celé se to oblepilo lepicí páskou pro utěsnění. Z experimentu se zjistilo, že tento způsob není příliš kvalitní a došlo



se k závěru, že vícenásobné (alespoň pětkrát) obvázání provázkem pomáhá k lepšímu upevnění membrány.

Obrázek 42: Nanovláknenná membrána – forma upevnění

Vliv aranžérské hmoty – do skleněné nádoby se vložila aranžérská hmota pro vyšší nasákavost proteklé vody. Je důležité dbát na správný výběr hmoty. Zde nastala chyba, že se použila aranžérská hmota, která nebyla nasákavá. Aranžérská hmota byla aplikovaná do skleněné

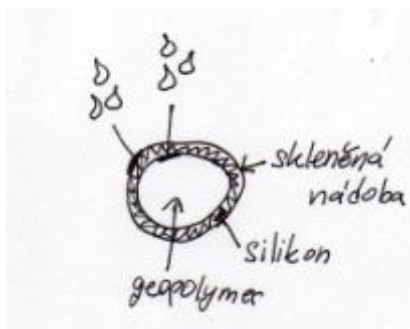


nádoby takovým způsobem, že byla uvnitř natěsno a voda proteklá membránou se nemohla vsáknout do hmoty a zůstala na povrchu. Na obrázku 43 (vlevo) je zobrazené schéma.

Obrázek 43: Schéma s aranžérskou hmotou

## Geopolymer

Protékání kolem těsnění – zde byla chyba v utěsnění silikonem. Chybou bylo, že silikon nepřilnul ke skleněné nádobě nebo vzorku geopolymery.



Názorná ukázka možného průsaku vody je zobrazeno na obrázku 44. V označených místech se symbolem kapek je zobrazena závada. Chyba nastala nedokonalým zaschnutím silikonu nebo tenké vrstvy, která nedokázala plnit těsnicí funkci.

Obrázek 44: Schéma možného průsaku vody

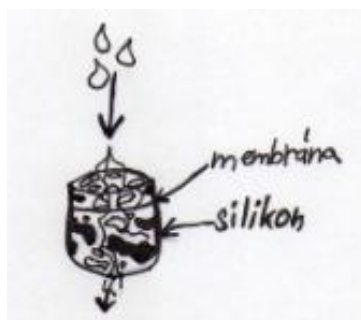
Popraskání struktury – popraskaný povrch geopolymery je způsoben rychlým vysycháním (za použití sušící pece) nebo při mnohonásobném použití při zátěži vodním sloupcem. Tento



druhý případ byl naší příčinou. Tato chyba nastala, když byl vzorek vystaven vodnímu sloupci a poté samovolně vysychal a poté byl použit znovu a po dalším vysychání se utvořily trhliny na jeho povrchu.

Obrázek 45: Popraskaný povrch geopolymery

Ucpání pórů silikonem – tento druh chyby nastal v případě, kdy byl použit geopolymer s příměsí



hliníku, který uvnitř jeho struktury tvoří póry. Silikon se aplikoval na stěny vzorku, kdy se při jeho aplikaci dostal dovnitř póru. Na obrázku 46 je zobrazený možný způsob ucpání pórů a zabránění průsaku vody plochou vzorku. Na obrázku 47 je zobrazen detailní pohled na stěny geopolymery potažené vrstvou silikonu.

Obrázek 46: Schéma ucpání pórů



Obrázek 47: Silikon na stěnách geopolymery

Silikon na spodní části vzorku – v tomto případě se silikon aplikoval dovnitř skleněné nádoby

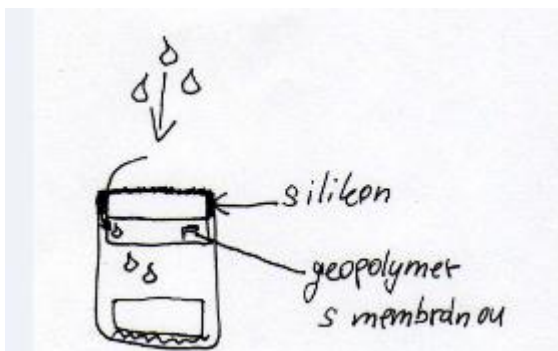


Obrázek 48: Silikonová vrstva uvnitř skleněné nádoby

a poté se vložil vzorek geopolymery. Chyba zde byla taková, že vrstva silikonu byla moc velká a po vložení vzorku se silikon dostal na dno vzorku a znemožnil tak průsaku vody. Veškerá kapalina byla zadržena ve vzorku geopolymery a nemohla se dostat skrz silikon.

### Geopolymer s membránou

Když se při testování klasického geopolymery s membránou umístil silikon do vrchní části,



kapalina se dostala přes silikon a protekla skrz membránu. Voda se dostala přes silikon a dostala se pod membránu, kdy byl vzorek nasáklý a propustil tak více vody.

Obrázek 49: Schéma geopolymery s membránou

## Závěr

Možným řešením na ochranu staveb proti vlhkosti bylo navrženo použití třívrstvé nanovlákněné membrány z polyuretanových vláken. Nanovlákněná membrána má velmi dobré vlastnosti z hlediska paropropustnosti a prodyšnosti. Při řešení ochrany staveb jsou tyto vlastnosti ideální při prostupu vodních par stavbou. Nanovlákněná membrána je vhodná jako hydrozábrana při povodních a ve spojení s omítkou při restaurování památek a jiných staveb.

Pro měření průniku vlhkosti, respektive propustnosti vody byl sestaven experiment simulující dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu, např. při povodních. Pomocí navržené metodiky měření propustnosti vody se mohlo porovnat chování stavebního materiálu, kterým byl geopolymer při použití v kombinaci s nanovlákněnou membránou a samostatně. Testovaný vzorek byl vystaven dlouhodobému působení vodního sloupce. Účelem zkoušky bylo určit propustnost vody v  $\text{kg.m}^{-2}$  na známou plochu vzorku za určitý čas při působení daného hydrostatického tlaku. Sledovaným parametrem byla hmotnost vody v gramech, která pronikla vzorkem a výsledný hmotnostní přírůstek.

Testování nanovlákněné membrány bylo přizpůsobené s ohledem na dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu z hlediska působení při povodni. Měření vzorků nanovlákněné membrány bylo vystaveno 24 hodinovému působení vlhkosti, což představuje prvotní zasažení stavby povodní. Dále byly vzorky vystaveny 4 denní zátěži, po tomto časovém úseku již povodeň postupně ustupuje. Celková průměrná propustnost vody při 24 hodinovém působení činila  $3,09 \text{ kg.m}^{-2}$ . Po 4 denní zátěži vodním sloupcem byla průměrná propustnost vody  $6,17 \text{ kg.m}^{-2}$  (při zátěži 1,5 m vysokého vodního sloupce  $8,04 \text{ kg.m}^{-2}$ ).

Významný přínos přineslo testování geopolymery, který má velmi dobré vlastnosti, a to vysokou pevnost a nehořlavost. Nehořlavost u tohoto materiálu je významná při ochraně dřevostaveb, kde je tato vlastnost velice příznivá. Experimentů s geopolymery se provedlo hned několik. V prvotní fázi byl testován geopolymer jako samostatný materiál a následně ve spojení s nanovlákněnou membránou, která byla uprostřed geopolymery. Vzorky byly vystaveny 24 hodinové zátěži vodním sloupcem. Průměrná propustnost vody geopolymery s membránou činila  $0,05 \text{ kg.m}^{-2}$  a bez membrány  $0,11 \text{ kg.m}^{-2}$ . Z výsledků je patrné, že nanovlákněná membrána zde plní funkci hydrozábrany.

Dalším hlediskem výzkumu byl přidáný hliník do směsi geopolymery, který v materiálu způsobuje póry a tím se stává více nasákový. Měření geopolymery probíhalo s příměsí 0,5 %

a 1 % hliníku. Při měření se vyskytlo několik chyb, a to v přípravě vzorků. Stěny vzorků byly potřeny silikonem, aby jimi nemohla proniknout kapalina. U některých vzorků nebyl žádný přírůstek hmotnosti, toto zjištění bylo způsobené zmíněným silikonem, který ucpal póry, a kapalina nemohla plynule proniknout celým vzorkem. U měření geopolymery (s 1 % hliníku) s membránou byla průměrná propustnost vody  $1,61 \text{ kg.m}^{-2}$ , což přibližně odpovídá 1,5 litru na metr čtvereční. U vzorků geopolymery bez membrány byla průměrná propustnost vody  $1,98 \text{ kg.m}^{-2}$ , což přibližně odpovídá 2 litrům vody na metr čtvereční. S 0,5% příměsí hliníku byla průměrná propustnost vody  $0,16 \text{ kg.m}^{-2}$  u geopolymery s membránou a bez membrány  $1,85 \text{ kg.m}^{-2}$ . V obou případech byla propustnost vyšší u vzorků geopolymery bez membrány, takže můžeme opět konstatovat, že nanovlákná membrána má podstatný vliv při ochraně proti vlhkosti.

Nakonec se experimentovalo s odlišnými formičkami na výrobu geopolymery, kdy průměr vzorku byl 5 cm, tím nebylo potřeba vzorek brousit na tento požadovaný průměr. Další výhodou formiček bylo jejich dno, na které se aplikovala nanovlákná membrána, která poté byla na povrchu vzorku.

Provedenými experimenty bylo dosaženo zjištění, že aplikace nanovlákné membrány snižuje propustnost vody geopolymery, respektive stavby. Navržený kompozit s nanovláknou membránou zde funguje jako ochrana stavby proti vlhkosti.



## Literatura

- [1] Mayerová K. *Využití nanovlákněné membrány pro ochranu dřevostaveb proti vlhkosti*. Liberec, 2016. Diplomová práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci. Vedoucí práce Ludmila Fridrichová.
- [2] Růžicková G. *Nadměrná vlhkost v domě i bytě ohrožuje naše zdraví*. [online]. Editováno 01. 03. 2014, 8:53 UTC. [vid. 16. 05. 2017] Dostupné z: <https://www.novinky.cz/bydleni/jak-na-to/328375-nadmerna-vlhkost-v-dome-i-byte-ohrozuje-nase-zdravi.html>.
- [3] Kupčková A. *Jak se rychle zbavit vlhkosti a plísně v bytě či domě*. [online]. Editováno 17. 02. 2008, 1:00 UTC. [vid. 16. 05. 2017] Dostupné z: [http://bydleni.idnes.cz/jak-se-rychle-zbavit-vlhkosti-a-plisne-v-byte-ci-dome-fyt-/stavba.aspx?c=A080215\\_153043\\_rodinne\\_domy\\_web](http://bydleni.idnes.cz/jak-se-rychle-zbavit-vlhkosti-a-plisne-v-byte-ci-dome-fyt-/stavba.aspx?c=A080215_153043_rodinne_domy_web).
- [4] Šebek P. *Příčiny vlhkosti a jejich projevy*. [online]. [vid. 16. 05. 2017] Dostupné z: <http://www.brickservis.cz/montazni-postupy-rady-doporuceni/nezadouci-vlhkost-staveb-jejich-priciny-a-odstraneni/priciny-vlhkosti-a-jejich-projevy/>.
- [5] Klímová L. *Vlhkost v domě: Proč vzniká a jak s ní bojovat*. [online]. Editováno 15. 03. 2011. [vid. 16. 05. 2017] Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/stavba/vlhkost-v-dome-proc-vznika-a-jak-s-ni-bojovat.aspx>. ISSN 1803-4160.
- [6] K123-Katedra stavebních materiálů. *Základní fyzikální vlastnosti stavebních materiálů ve vazbě na izolační vlastnosti*. [online]. [vid. 15. 01. 2018] Dostupné z: [http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaII\\_IZMA.pdf](http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaII_IZMA.pdf).
- [7] eAGRI. *Povodně*. [online]. [vid. 29. 10. 2017] Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/voda/prehledy-a-statistiky/povodne/>.
- [8] Navrátil J. *Živelní pohromy a provozní havárie*. [online]. Editováno 11. 03. 2012. [vid. 29. 10. 2017] Dostupné z: <https://moodle.unob.cz/mod/resource/view.php?id=9801>.
- [9] Český hydrometeorologický ústav. *Typy povodní*. [online]. [vid. 26. 11. 2017] Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/ruzne/vyuka/HYDRO/14.pdf>.
- [10] Český hydrometeorologický ústav. *Informace o povodních*. [online]. [vid. 27. 11. 2017] Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/ruzne/vyuka/HYDRO/13.pdf>.
- [11] VÚV T.G.M. *Mapy povodňového nebezpečí*. [online]. [vid. 28. 11. 2017] Dostupné z: [http://www.dibavod.cz/data/poster\\_mapy\\_nebezpeci.pdf](http://www.dibavod.cz/data/poster_mapy_nebezpeci.pdf).

- [12] VÚV T.G.M. *Mapy povodňového rizika*. [online]. [vid. 28. 11. 2017] Dostupné z: [http://www.dibavod.cz/data/poster\\_mapy\\_rizik.pdf](http://www.dibavod.cz/data/poster_mapy_rizik.pdf).
- [13] Český hydrometeorologický ústav. *Historie povodní na území Čech, Moravy a Slezska*. [online]. [vid. 27. 11. 2017] Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/ruzne/vyuka/HYDRO/2.pdf>.
- [14] Příspěvatelé Wikipedie. *Povodeň v Česku (2006)*. [online]. Editováno 26. 09. 2017, 08:44 UTC. [vid. 27. 11. 2017] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povode%C5%88\\_v\\_%C4%8Cesku\\_\(2006\)&oldid=15351666](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povode%C5%88_v_%C4%8Cesku_(2006)&oldid=15351666).
- [15] Příspěvatelé Wikipedie. *Povodeň v Česku (2009)*. [online]. Editováno 26. 09. 2017, 08:07 UTC. [vid. 27. 11. 2017] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povode%C5%88\\_v\\_%C4%8Cesku\\_\(2009\)&oldid=15351553](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povode%C5%88_v_%C4%8Cesku_(2009)&oldid=15351553).
- [16] Příspěvatelé Wikipedie. *Povodně ve střední Evropě v květnu 2010*. [online]. Editováno 25. 09. 2017, 16:27 UTC. [vid. 27. 11. 2017] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povodn%C4%9B\\_ve\\_st%C5%99edn%C3%AD\\_Evrop%C4%9B\\_v\\_kv%C4%9Btnu\\_2010&oldid=15350385](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povodn%C4%9B_ve_st%C5%99edn%C3%AD_Evrop%C4%9B_v_kv%C4%9Btnu_2010&oldid=15350385).
- [17] Příspěvatelé Wikipedie. *Povodeň na Lužické Nise 2010*. [online]. Editováno 25. 09. 2017, 16:28 UTC. [vid. 27. 11. 2017] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povode%C5%88\\_na\\_Lu%C5%BEick%C3%A9\\_Nise\\_2010&oldid=15350389](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povode%C5%88_na_Lu%C5%BEick%C3%A9_Nise_2010&oldid=15350389).
- [18] Příspěvatelé Wikipedie. *Povodeň v Čechách (2013)*. [online]. Editováno 25. 09. 2017, 15:58 UTC. [vid. 27. 11. 2017] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povode%C5%88\\_v\\_%C4%8Cech%C3%A1ch\\_\(2013\)&oldid=15350295](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povode%C5%88_v_%C4%8Cech%C3%A1ch_(2013)&oldid=15350295).
- [19] Hladný J. a spol. *Katastrofální povodeň v České republice v srpnu 2002*. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR. 2005. 68 s. ISBN 80-7212-350-5.
- [20] Kubala M. *Statistika průtoku Vltavy v Praze při povodních*. [online]. Editováno 10.5.2014. [vid. 6.11.2017] Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2507331/>.
- [21] Roček F. *POVODNĚ 2002: Doprava v kraji kolabovala. Velké mosty byly k ničemu*. [online]. Editováno 16. 08. 2017. [vid. 06. 11. 2017] Dostupné z: <https://teplicky.denik.cz/z->



regionu/povodne-2002-labe-rozdelilo-usti-na-dve-mesta-velke-mosty-byly-k-nicemu-20170816.html.

[22] ČT24. *Proč vznikly povodně v létě 2002? Pohled meteorologa*. [online]. Editováno 07. 08. 2017. [vid. 06. 11. 2017] Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/veda/2204290-proc-vznikly-povodne-v-lete-2002-pohled-meteorologa>.

[23] Janouš V. *Voda protékla domy v Zářečí před dvěma lety. Zdi jsou stále vlhké*. [online]. Editováno 20. 06. 2015. [vid. 06. 11. 2017] Dostupné z: [https://budejovice.idnes.cz/povodne-2013-v-bechynske-ctvrti-zareci-dve-/budejovice-zpravy.aspx?c=A150618\\_111659\\_budejovice-zpravy\\_khr](https://budejovice.idnes.cz/povodne-2013-v-bechynske-ctvrti-zareci-dve-/budejovice-zpravy.aspx?c=A150618_111659_budejovice-zpravy_khr).

[24] Kabátová M. *Povodeň? Proti té bojujeme denně, říkají v Zálezlicích*. [online]. Editováno 13. 08. 2017. [vid. 06. 11. 2017] Dostupné z: [https://www.lidovky.cz/povoden-proti-te-bojujeme-denne-rikaji-v-zalezlicich-fhi-/zpravy-domov.aspx?c=A170812\\_211124\\_ln\\_domov\\_ELE](https://www.lidovky.cz/povoden-proti-te-bojujeme-denne-rikaji-v-zalezlicich-fhi-/zpravy-domov.aspx?c=A170812_211124_ln_domov_ELE).

[25] Kubát J. *Vyhodnocení povodní v červnu 2013*. [online]. Editováno 07. 02. 2014 [vid. 03. 01. 2018]. Dostupné z: [http://voda.chmi.cz/pov13/DilciZprava\\_DU\\_4\\_2\\_Ekon-dopady\\_final.pdf](http://voda.chmi.cz/pov13/DilciZprava_DU_4_2_Ekon-dopady_final.pdf)

[26] Zahradníček V. *Domem v záplavové oblasti musí voda jen rychle projít*. [online]. Editováno 14. 08. 2009 [vid. 14. 12. 2017] Dostupné z: [https://bydleni.idnes.cz/domem-v-zaplavove-oblasti-musi-voda-jen-rychle-projit-pd8-/stavba.aspx?c=A090713\\_143535\\_stavba\\_rez](https://bydleni.idnes.cz/domem-v-zaplavove-oblasti-musi-voda-jen-rychle-projit-pd8-/stavba.aspx?c=A090713_143535_stavba_rez).

[27] Dědečková L. *Geopolymery: Budoucnost mostního stavitelství?* [online]. Editováno 14. 10. 2010 [vid. 04. 04. 2018] Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/geopolymery-budoucnost-mostniho-stavitelstvi/>.

[28] České lupkové závody. *Geopolymer – obecné informace*. [online]. Editováno 2006-2018 [vid. 04. 04. 2018] Dostupné z: [http://www.cluz.cz/cz/geopolymer-obecne-informace?gclid=EAIaIQobChMIx72B8uSe2gIVjArTCh3hZAtCEAAAYASAAEgJvs\\_D\\_BwE](http://www.cluz.cz/cz/geopolymer-obecne-informace?gclid=EAIaIQobChMIx72B8uSe2gIVjArTCh3hZAtCEAAAYASAAEgJvs_D_BwE).

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Nasákavost vybraných stavebních materiálů [6].....	18
Obrázek 2: Stupně povodňové aktivity [8].....	22
Obrázek 3: 1. Stupeň povodňové aktivity – bdělost [10].....	22
Obrázek 4: 2. Stupeň povodňové aktivity – pohotovost [10].....	23
Obrázek 5: 3. Stupeň povodňové aktivity – ohrožení [10] .....	23
Obrázek 6: 3. Stupeň povodňové aktivity – extrémní povodeň [10].....	23
Obrázek 7: Ukázka povodňové mapy v 1D modelu [11].....	24
Obrázek 8: Ukázka povodňové mapy ve 2D modelu [11].....	25
Obrázek 9: Barevné škály kategorie ohrožení ploch v záplavovém území [12] .....	26
Obrázek 10: Třídy ploch [12].....	26
Obrázek 11: Mapa rizika [12] .....	27
Obrázek 12: Mapa ohrožení [12].....	28
Obrázek 13: Porovnání povodní z hlediska průtoku v letech 2002, 2006 a 2013 [20].....	32
Obrázek 14: Keramické tabulky připomínající povodňovou událost [23] .....	34
Obrázek 15: Autobusová zastávka zachycující povodně v letech 2002 a 2013 [24].....	36
Obrázek 16: Městské části hlavního města Prahy postižené povodněmi v červnu 2013 a odhad škod na jejich území [25] .....	39
Obrázek 17: První podlaží domu [26] .....	40
Obrázek 18: Dům stavěný difúzně otevřeným systémem [26] .....	42
Obrázek 19: Dům, kde nebyla použita omítka [26].....	43
Obrázek 20: Geopolymer s membránou (vlevo) a nanovláknenná membrána v řezu (vpravo) .....	45
Obrázek 21: Schéma metodiky měření.....	49
Obrázek 22: Prvotní fáze přípravy vzorků.....	53
Obrázek 23: Formičky zalité vrstvou geopolymery.....	53
Obrázek 24: Názorná ukázka upevnění membrány .....	55
Obrázek 25: Geopolymer s membránou .....	57
Obrázek 26: Samostatný geopolymer.....	58
Obrázek 27: Vzorek s mikrotenovým sáčkem.....	58
Obrázek 28: Geopolymer po zátěži vodním .....	59
Obrázek 29: Příprava vzorku se silikonem (vlevo) a připravený vzorek pro experiment (vpravo) .....	59
Obrázek 30: Označení skleniček ve výšce 1 cm (vlevo) a probíhající reakce uvnitř směsi (vpravo)....	60
Obrázek 31: Grafické znázornění závislosti přidaného hliníku do geopolymery.....	61
Obrázek 32: Schéma geopolymery.....	61

Obrázek 33: Vzorky geopolymery s 1 % hliníku .....	62
Obrázek 34: Vzorky geopolymery s 0,5 % hliníku.....	63
Obrázek 35: Geopolymer v tekutém stavu (vlevo) a geopolymer po vytvrzení (vpravo) .....	65
Obrázek 36: Vzorky geopolymery s 1 % hliníku a nanovláknennou membránou navrchu .....	65
Obrázek 37: Vzorky geopolymery s 1 % hliníku a nanovláknennou membránou navrchu .....	66
Obrázek 38: Příprava směsi    Obrázek 39: Formičky naplněné směsí geopolymery .....	73
Obrázek 40: Vzorky zakryté fólií .....	73
Obrázek 41: Schéma závady – mikrotenový sáček.....	74
Obrázek 42: Nanovláknenná membrána – forma upevnění.....	74
Obrázek 43: Schéma s aranžérskou hmotou .....	74
Obrázek 44: Schéma možného průsaku vody.....	75
Obrázek 45: Popraskaný povrch geopolymery .....	75
Obrázek 46: Schéma ucpání pórů.....	75
Obrázek 47: Silikon na stěnách geopolymery .....	76
Obrázek 48: Silikonová vrstva uvnitř skleněné nádoby.....	76
Obrázek 49: Schéma geopolymery s membránou .....	76

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled poškozených (zničených) obytných objektů při povodních v červnu 2013 .....	37
Tabulka 2: Podíl celkových škod na bydlení při povodních v červnu 2013.....	37
Tabulka 3: Podíl škod na majetku v jednotlivých krajích podle vlastníka (tis. Kč) .....	38
Tabulka 4: Výsledky testování nanovlákněné membrány II. generace .....	54
Tabulka 5: Testování různého upevnění nanovlákněné membrány na skleničku .....	55
Tabulka 6: Měření nanovlákněné membrány II. generace .....	56
Tabulka 7: Výsledky testování varianty s geopolymérem .....	57
Tabulka 8: Výsledky testování geopolyméru i samostatné membrány .....	58
Tabulka 9: Výsledky měření geopolyméru s 1 % hliníku s membránou .....	62
Tabulka 10: Výsledky měření geopolyméru s 1 % hliníku bez membrány.....	63
Tabulka 11: Výsledky měření geopolyméru s 0,5 % hliníku s membránou.....	64
Tabulka 12: Výsledky měření geopolyméru s 0,5 % hliníku bez membrány.....	64